Aus dem Strahleninstitut und -Klinik
der Freien Universität Berlin
im Städtischen Krankenhaus Westend
Direktor: Professor Dr. med. Heinz Oeser

Vereinfachung der quantitativen Absorptionsmessung zur Calciumbestimmung im menschlichen Skelettsystem

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der medizinischen Doktorwürde

an der

Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Herbert Imig

aus Bonn

1966

Druck:
ERNST-REUTER-GESELLSCHAFT
der Förderer und Freunde der Freien Universität Berlin e.V.
DISSERTATIONS-DRUCKSTELLE
1 Berlin 33, Garystr. 45

Aus dem Strahleninstitut und -Klinik
der Freien Universität Berlin
im Städtischen Krankenhaus Westend
Direktor: Professor Dr. med. Heinz Oeser

Vereinfachung der quantitativen Absorptionsmessung zur Calciumbestimmung im menschlichen Skelettsystem

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der medizinischen Doktorwürde

an der

Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Herbert Imig

aus Bonn

Dekan: Professor Dr. med. Alfred N. Witt
Referent: Professor Dr. med. Heinz Oeser
Korreferent: Professor Dr. med. Hans-Joachim Dulce

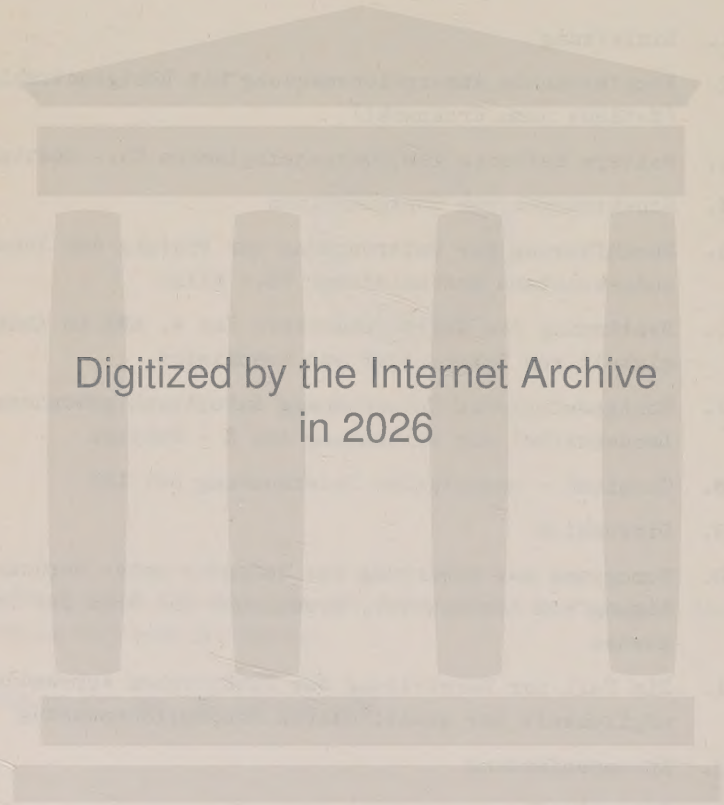
UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK - LEIDEN -

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

Promoviert am: 18. Oktober 1966

Vereinfachung der quantitativen Absorptionsmessung
zur Calciumbestimmung im menschlichen Skelettsystem

1. Einleitung
2. Vergleichende Absorptionsmessung mit Röntgenstrahlen (Methode nach Krokowski)
3. Weitere Methoden zur röntgenologischen Ca.- Bestimmung
4. Schwärzungen von Röntgenfilmen
5. Durchführung der Untersuchung zur Prüfung der Schwärzungskonstanz verschiedener Rö.- Filme
6. Bestimmung des Querdurchmessers des 4. LWK in Abhängigkeit von Lebensalter und Geschlecht
7. Röntgenologische Untersuchung autoptisch gewonnener Lendenwirbel zur Berechnung des K - Faktors
8. Chemisch - analytische Untersuchung der LWK
9. Diskussion
10. Nomogramm zur Bewertung des Befundes unter Berücksichtigung von Lebensalter, Geschlecht und Grad der Osteoporose
11. Ein Fall zur Darstellung der Praktischen Verwendungsmöglichkeit der quantitativen Absorptionsmessung
12. Zusammenfassung
13. Literatur
14. Danksagung



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546527_0083

Einleitung

Neueste Erkenntnisse auf dem Gebiet der Endokrinologie haben den Einfluß von Stoffwechselstörungen auf Strukturveränderungen des Skelettsystems erkannt, und hier ist es vor allem die Demineralisation, die im Mittelpunkt steht, da neben der reinen Stützfunktion des Knochens seine Rolle im Mineralstoffwechsel zu klären versucht wurde.

Die Diagnostik läuft also insbesondere darauf hinaus, durch eine einfache und unblutige Bestimmung den quantitativen Mineralsalzgehalt des Knochens zu erlangen und somit Entkalkungsprozesse festzustellen und Einblick in den gesamten osteoporotischen Formenkreis zu gewinnen.

Hauptinteresse besitzt vor allem eine Bestimmung des Mineralsalzgehaltes in der Wirbelsäule, da bei der pathologischen Osteoporose in erster Linie eine centrifugale Entwicklung zu beobachten ist. Aber gerade hier ist eine röntgenologische Feststellung des Mineralsalzgehaltes mit besonderen Schwierigkeiten verbunden. Viele Methoden konnten mit zum Teil guten Erfolgen an den distalen Skelettabschnitten angewandt werden, aber erst die von Krokowski 1959 entwickelte "quantitative Absorptionsmessung" war auch für Mineralsalzbestimmungen geeignet.

Aufgabe dieser Arbeit ist es, die verwendeten Filmmaterialien im Hinblick auf die Methode zu prüfen, und die Messung zu vereinfachen, um sie der praktischen Anwendungsmöglichkeit zugänglicher zu machen.

Vergleichende Absorptionsmessung mit Röntgenstrahlen (Methode nach Krokowski)

Theoretische Grundlage der Methode

Im konventionellen Röntgendiagnostik-Bereich (bis etwa 100 kV Röhrenspannung) ist die Strahlenabsorption in den biologischen Medien im wesentlichen vom sogenannten Fotoeffekt abhängig. Ausschlaggebend hierbei ist die Ordnungszahl. Das im Hydroxylapatit eingelagerte Calcium wird dadurch zum Indikator für die im Knochen vorhandene Hydroxylapatitmenge. Bei einer Röhrenspannung von 200 kV bestimmt der Comptoneffekt das Ausmaß der Strahlenabsorption, dieser hängt von der Elektronen-Konzentration im absorbierenden Material ab. Die in biologischen Geweben vorhandenen Elemente unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Elektronendichte nicht wesentlich, so daß bei dieser harten, zusätzlich stark gefilterten Röntgenstrahlung kaum Absorptionsunterschiede auftreten. Die vergleichende Absorptionsmessung mit Röntgenstrahlen von 60 kV und 200 kV Röhrenspannung erlaubt somit die Faktoren Dichte, Dicke des Knochens und des umgebenden Weichteilmantels, sowie filmtechnische Einflüsse zu eliminieren, da sie auf beiden Röntgenaufnahmen gleichermaßen wirksam sind. Durch Elimination der genannten Faktoren wird es möglich, die bestimmende Ordnungszahl des untersuchten Mediums (im vorliegenden Falle des Calciums im Knochen) zu ermitteln.

Praktische Durchführung

Von dem zu untersuchenden Skeletteil, Z.B. der Wirbelsäule, werden im seitlichen Strahlengang Röntgenaufnahmen mit

60 kV und 200 kV angefertigt. Die auf den Röntgenaufnahmen abgebildeten Wirbelkörper sowie das paravertebrale knochenfreie Weichteilgewebe werden jeweils in einem Bezirk von 6mm fotometriert. Um von den Eigenschaften des Filmes unabhängig zu sein, werden die gemessenen Schwärzungsdifferenzen als Schwächungsgleichwerte eines Plexiglasphantoms angegeben. Die Schwächungsgleichwert-Differenz beider mit verschiedenen Strahlenqualitäten angefertigten Aufnahmen werden mit dem Querdurchmesser des untersuchten Wirbelkörpers addiert. Das Resultat ist der Schwächungsgleichwert des Knochens. Nach Quotientenbildung erhält man den sogenannten K-Wert, welcher identisch mit einem bestimmten Calciumgehalt des Knochens ist. (1-10)

Andere Methoden

Im Folgenden seien einige andere Untersuchungsmethoden zur quantitativen Beurteilung des Mineralsalzgehaltes im Knochen erläutert. Jedoch haftet allen der Nachteil an, daß sie nur an peripheren Knochen zur Anwendung gebracht werden können.

a) Akustische Methode

Bei Beklopfen der Crista anterior tibiae entstehen Schallwellen, die mit Hilfe eines Körperschallmikrofons auf ein sogenanntes endloses Tonband geleitet werden. An Hand der verschiedenen Frequenzspektren sollen sich osteoporotische Vorgänge abgrenzen lassen. (12)

b) Methode der vergleichenden Schwärzungsmessung

Das Verfahren beruht auf einer vergleichenden Messung der Bildschwärze des zu untersuchenden Objekts und eines bekannten Bezugsystems. Engström und Welin (1941) nahmen als Bezugssystem eine Aluminiumtreppe (16), Mack und Mitarbeiter (1949) einen Elfenbeinkeil (25), Henny (1950) eine Treppe aus Rinderknochen (20), Jackson (1950) einen Ochsenknochen (24). Letzterer versuchte auch erstmalig den störenden Weichteilfaktor dadurch auszuschalten, daß er die Objekte in einer Wasserwanne aufnahm. Dieser Technik bedienten sich auch Spiegler und Mitarbeiter (23). In zwei getrennten Wasserkammern nehmen Balz und Birkner (1956) den Knochen in der einen und eine Aluminiumtreppe in der anderen gleichzeitig auf. Markierte Stellen der Knochen und deren Schwärzung auf dem Röntgenfilm werden nun auf der Aufnahme der Aluminiumtreppe fotometrisch

aufgesucht und ein sogenannter Al.-Schwächungsgleichwert gefunden, welcher in Beziehung zum Mineralsalzgehalt des Knochens steht (Ordnungszahl: Aluminium 14,0, Knochen 13,8). Wegen der niederen Aufnahmespannung und wegen des zu dicken Weichteilmantels kann dieses Verfahren zum Beispiel nicht an der LWS angewandt werden.

Heuck und Schmidt nehmen als Referenzsystem direkt Hydroxylapatit und gelangen durch ihre Messungen vor allem an Femur und Calcaneus zu recht genauen röntgenologischen Ergebnissen, die im Vergleich zu den chemisch-analytisch gewonnenen Werten Differenzen von 10% aufweisen (21,22). Sie berücksichtigen auch die Dicke des Knochens, und zwar wird dieser in zwei Ebenen aufgenommen, und die zwei verschiedenen Schwächungsgleichwerte ergeben zusammen mit der Dicke des Knochens rechnerisch den Hydroxylapatitgehalt. Um den störenden Weichteilmantel auszuschließen, wird die Hydroxylapatittreppe unmittelbar neben dem Knochen, also beim Femurhals zum Beispiel unter der Muskulatur, aufgenommen. Durch einen Spezialtubus werden die Weichteilmassen außerdem komprimiert und so ein genauer Abstand vom Fokus gewahrt, dabei sind Knochen und Treppe ungefähr vom gleichstarken Weichteilmantel bedeckt. Diese Methode ist leicht reproduzierbar und in jeder Klinik anzuwenden, beschränkt sich aber auf die Anwendung peripherer Skeletteile.

c) Quantitative Absorptionsbestimmung

Um nun alle Fehler, die mit der Verwendung von Röntgenfilmen, deren Aufnahme- und Entwicklungstechnik zusammenhängen

auszuschalten, wurde ein anderes Verfahren entwickelt, wobei die Schwächung der Röntgenstrahlen direkt mit Hilfe eines Dosimeters gemessen wird. (29). Györgyi und Bozóky (1960) bestimmen den "Transmissionsfaktor" indem sie den Quotienten aus der Absorption von Röntgenstrahlen im Knochen und in der Luft bilden und errechnen hieraus den Schwächungskoeffizienten. Ihre Messungen betreffen hauptsächlich die Femurkondylen (19).

Frommhold und Schoknecht (1960) bedienen sich ebenfalls der quantitativen Absorptionsmessung, indem sie monochromatische Röntgenstrahlen benutzen (Röhrenspannung 17 kV). Der zu untersuchende Skeletteil wird gleichmäßig durch den Röntgenstrahl geführt und trifft nacheinander Weichteil, Corticalis, Spongiosa, Corticalis, Weichteil. Die entstehenden Absorptionskurven geben nicht nur Auskunft über den Mineralsalzgehalt des Knochens, sondern auch über seine Struktur (17).

Einige weitere Verfahren der Diagnostik zur Calciumbestimmung sollen nur namentlich erwähnt werden. So die visuelle Deutung der Röntgenaufnahme, die mit einer sehr großen Fehlerbreite behaftet ist, die Feststellung des Skelettschmerzes, die Knochenbiopsie mit histologischer Untersuchung und die Ermittlung der Calcium und Stickstoffbilanz (13).

Schwärzungen von Röntgenfilmen

Die Schwärzung eines Films ist definiert als Logarithmus der Opazität, wobei unter Opazität das Verhältnis der auffallenden zur durchgelassenen Lichtmenge verstanden wird.

$$\text{Schwärzung} = \lg \frac{\text{auffallende Lichtmenge}}{\text{durchgelassene Lichtmenge}}$$

Da die Schwärzung zusätzlich durch die Eigenschaft bestimmter Filmemulsionen oder durch Unterschiede der Entwicklung und Verarbeitung beeinflußt wird, werden Gradatationskurven angefertigt. Eine Gradatationskurve gibt die Filmschwärzung in Abhängigkeit zur Strahlungsintensität wieder. Einmal werden diese Kurven durch die sogenannte "Zeitsensitometrie" gewonnen, wobei ein Film teilweise belichtet wird, während der übrige Teil verdeckt und die Abdeckung streifenweise zurückgezogen wird.
Die Schwärzungen der einzelnen Streifen werden fotometrisch gemessen und in ein Koordinatensystem gebracht: auf der Ordinate die Schwärzung S und auf der Abszisse der log der Belichtung. (Abb.1)

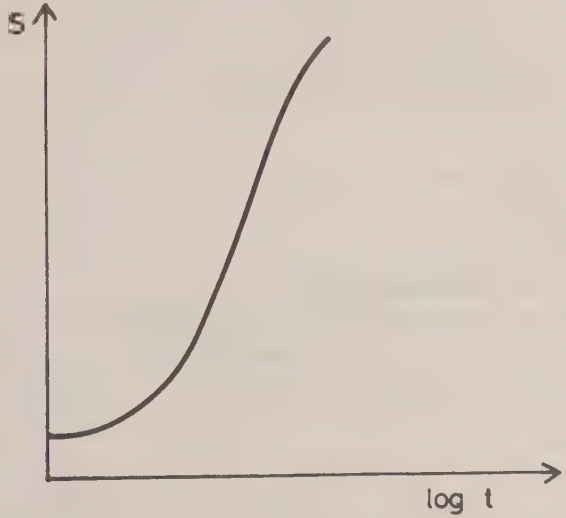


Abb.1

Die zweite Möglichkeit eine Gradatationskurve aufzustellen besteht in der "Intensitätssensitometrie". Der Film wird zum Beispiel durch einen Plexiglaskeil belichtet, wodurch eine Änderung der Belichtungsintensität erzielt wird. Grundsätzlich muß zwischen Schwärzungskurven durch Röntgenstrahlen und Lichtstrahlen unterschieden werden (19,27). Der Anstieg der Kurve(Gradatation)charakterisiert die Kontrastgebung des Films. Je steiler also die Kurve, desto kontrastreicher die Aufnahme. Der Anstieg wird durch den Winkel α festgelegt, den Gammawert (γ = tang α) oder Kontrastfaktor. (Abb.2)

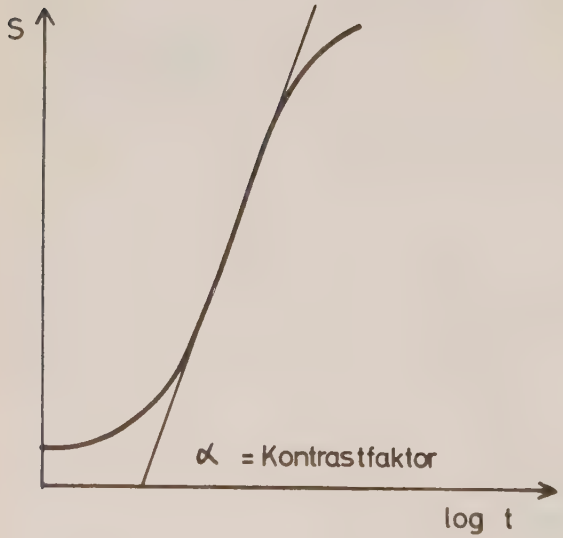


Abb.2

Durchführung der Untersuchung zur Prüfung der Schwärzungskonstanz verschiedener Röntgenfilme

Bei der röntgenologischen Mineralsalzbestimmung im Knochen auf Grund von Schwärzungsunterschieden ist es von Bedeutung, ob das verwandte Filmmaterial über eine genügende Schwärzungskonstanz verfügt. Es ist zu prüfen, ob unterschiedliche Filme und unterschiedliche Verarbeitung und Entwicklung derselben unterschiedliche Kontraste liefern. Schwärzungskonstanz ist gegeben, wenn die Gradationskurven parallel verlaufen, das heißt, wenn sie den gleichen Kontrastfaktor haben.

Mit folgenden Punkten soll die Schwärzungskonstanz von Röntgenfilmen untersucht werden:

1. Fotometrische Auswertung eines belichteten Films
2. Schwärzungskonstanz eines Rö.-Films nach 10 Tagen, 15 Tagen und 5 Wochen
3. Schwärzungskonstanz verschiedener Filme mit verschiedenem Verfallsdatum nach 10 Tagen, 15 Tagen und 5 Wochen
4. Schwärzungskonstanz von Rö.-Filmen mit älterem Verfallsdatum
5. Einfluß der Tageszeit auf die Entwicklung von Rö.-Filmen
6. Schwärzungskonstanz von Rö.-Filmen verschiedener Fabrikate

Versuchsanordnung (Abb.3)

Bei allen Untersuchungsreihen wurde die Versuchsanordnung jeweils konstant gehalten: Ein Plexiglaskeil von

der Höhe 15,9cm, Länge 23cm, Breite 12,1cm, wurde mit den unten angegebenen Daten einmal bei 60 kV, das andere Mal bei 200 kV belichtet, entwickelt und anschließend fotometriert. Die kV-Werte entsprechen denen, welche bei der quantitativen Absorptionsmessung angewandt werden.

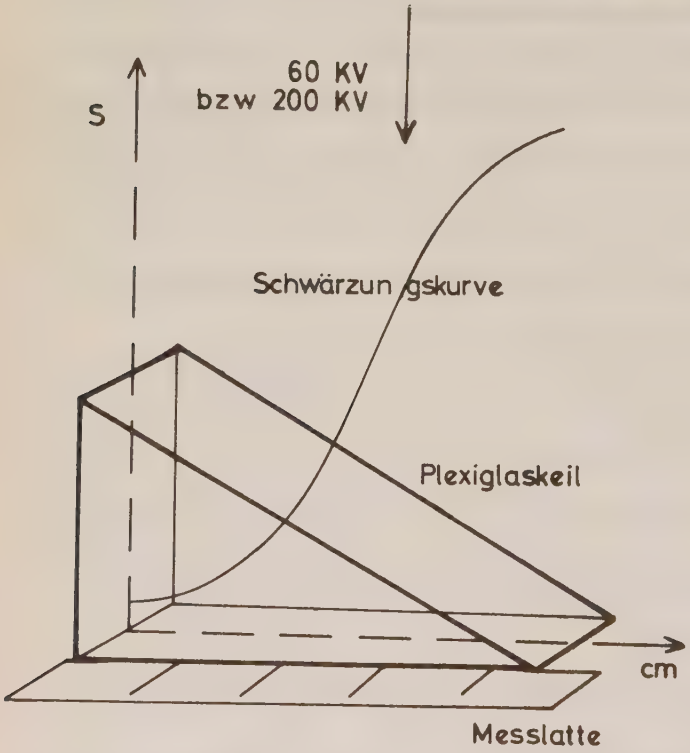


Abb.3

Aufnahmedaten	60 kV	Röhre: Philipps	
		Fokusabstand	90cm
		Belichtungszeit	0,05sec
	200 kV	Röhre: CHF Müller	
		Fokusabstand	90cm
		Belichtungszeit	0,12sec
		Filter	Cu 6mm

Folien feinkorn (Cawo)

Entwicklung maschinell mittels X - Omat (Kodak)

Filmmaterial

Firma	Filmnummer	Verfallsdatum
Kodak	389/221	Jan 67
Kodak	428/ 48	Feb 67
Kodak	428/ 69	März 67
Kodak	365/056	Dez 66
Kodak	944/ 53	Jan 66
Kodak	862/ 44	Sept 65
Agfa Gaevert	R 24290271 L	
Agfa Gaevert	25330421 T	April 67
Agfa Gaevert	25240003	März 66
Agfa Gaevert	25230271	April 66
Agfa	7012/272	Dez 65

Photometer

Photometer der Firma Lange Berlin zusammen mit einem Multiflex Galvanometer Typ MG 2 der gleichen Firma.

Messung

Die Schwärzungswerte S der Röntgenaufnahmen hinter dem Plexiglaskeil wurden auf der Mittellinie im Abstand von einem cm (eine Meßlatte mit Bleimarkierungen wurde neben dem Keil ebenfalls mitaufgenommen) fotometrisch bestimmt und in ein Kordinatensystem eingetragen: auf die Abscisse die Keillänge in cm und somit die Intensität der Röntgenstrahlen als abhängiger Wert von der Keildicke, auf der Ordinate die Schwärzungswerte S. Die Grundschleier der benutzten Filme wurden nicht berücksichtigt.

Da die Abweichungen der einzelnen S Werte in den Kurven

zu gering sind, werden sie in den Abbildungen nicht angegeben. Alle Kurven sind reproduzierbar, die Aufnahmen wurden nach jeweils einer Woche erneut fotometriert, und es ergaben sich immer die gleichen Kurven.

1. Fotometrische Auswertung eines belichteten Films

Die fotometrische Auswertung eines belichteten Films bei 60 kV und 200 kV in Längs- und Querrichtung ergibt folgendes Bild (Abb.4): Die Schwärzung nimmt vom Rand zur Mitte der Aufnahme stetig zu, jedoch beträgt der Anstieg von S Wert zu S Wert im Abstand von 1cm maximal 3% und kann bei weiteren Untersuchungen unberücksichtigt bleiben. Die unterschiedliche Schwärzung ist auf die Intensitätsverteilung der Röntgenstrahlen durch Streuung zurückzuführen.

2. S Konstanz eines Films nach 10 Tagen, 15 Tagen und 5 Wochen

In Abständen von mehreren Tagen bzw Wochen wurden von ein und demselben Film mit der Nummer 428/48 Keilaufnahmen bei 60 kV und 200 kV aufgenommen. Es sollte geklärt werden, ob der Zeitfaktor irgend einen Einfluß auf die Schwärzungskonstanz des Films nehmen kann. (Abb. 5-8) Aus den vier Zeichnungen ist zu entnehmen, daß alle Kurven den gleichen Anstieg, daß heißt Kontrastfaktor, haben: 60 kV 67°, 200 kV 54°. Eine Veränderung der Schwärzungskonstanz ist also in diesen Zeiträumen nicht vorhanden.

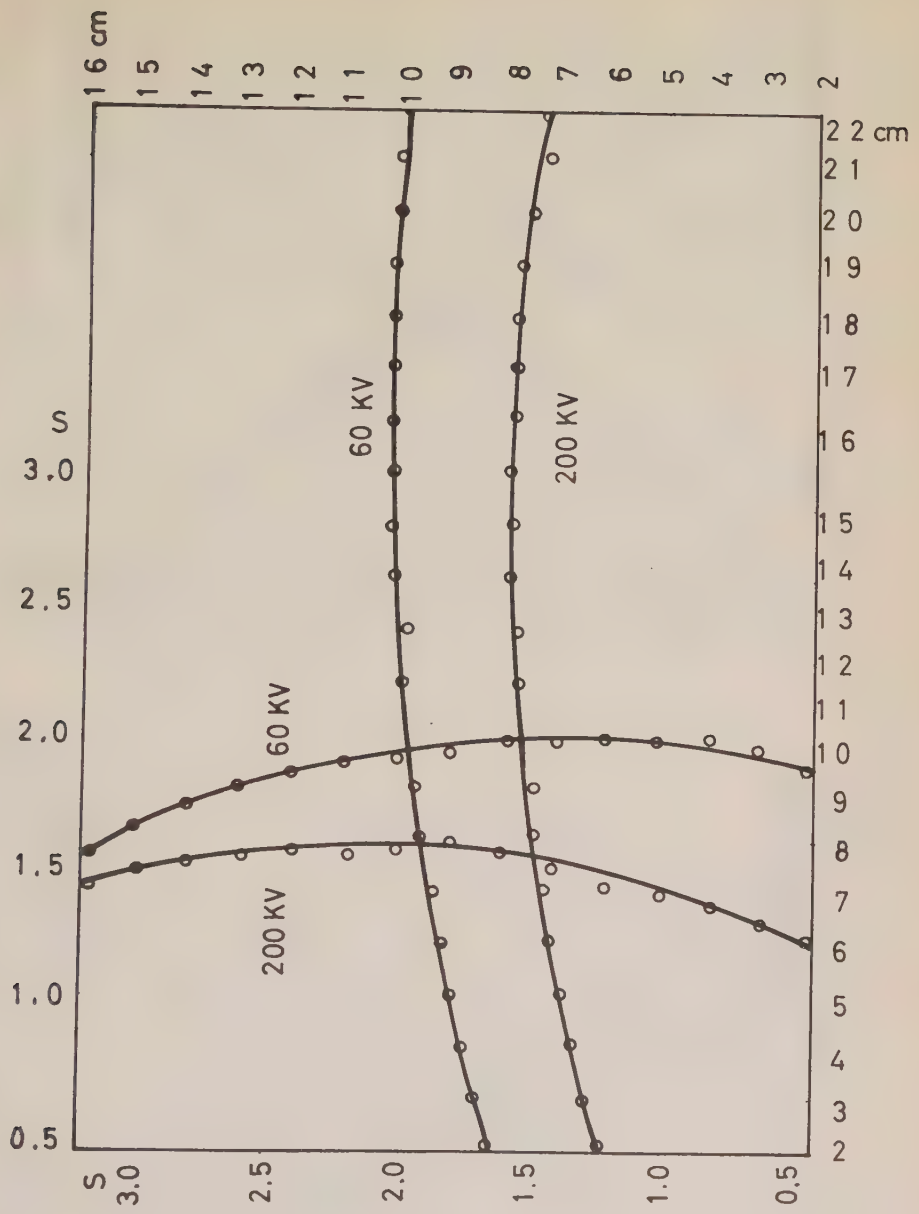
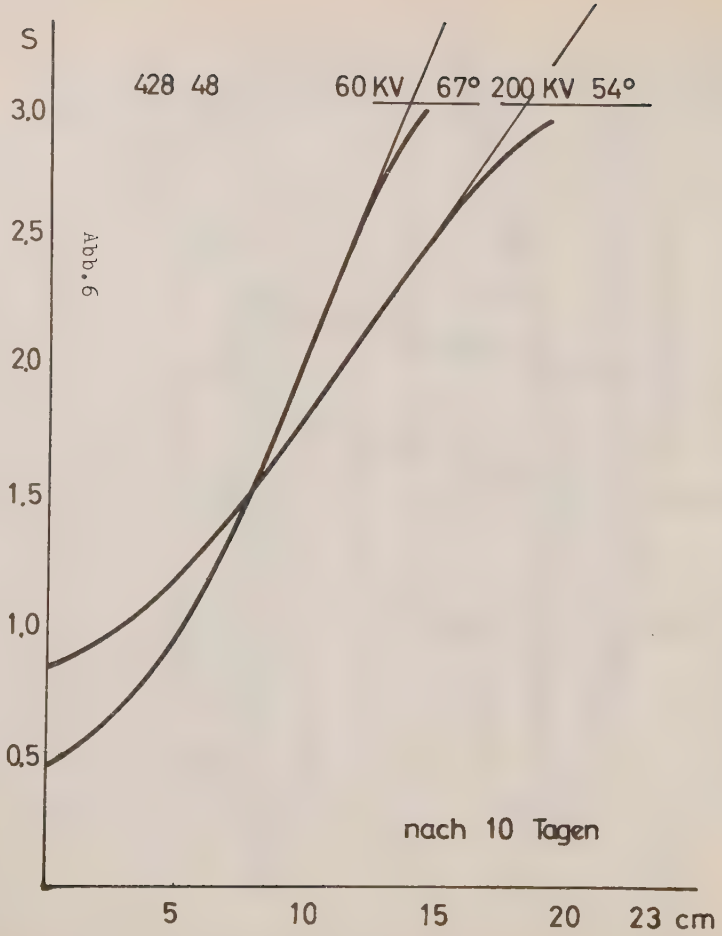
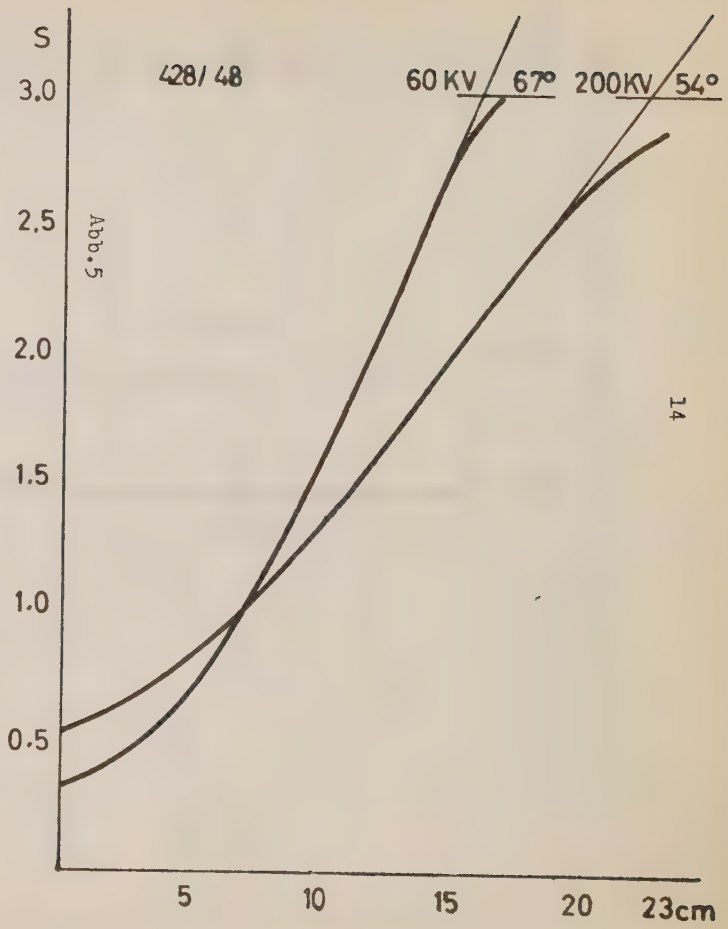
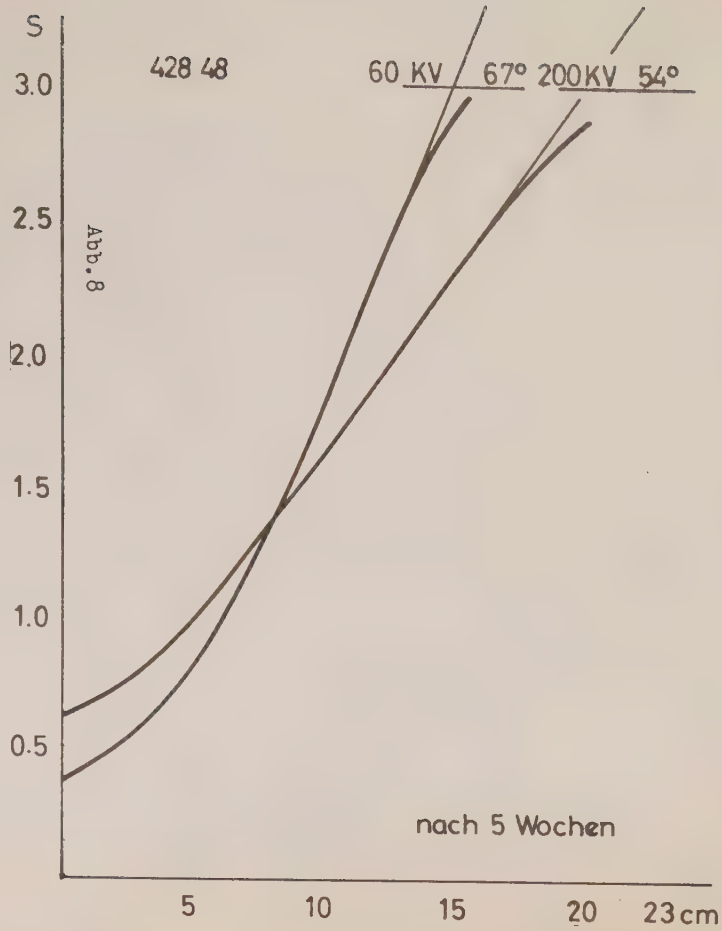
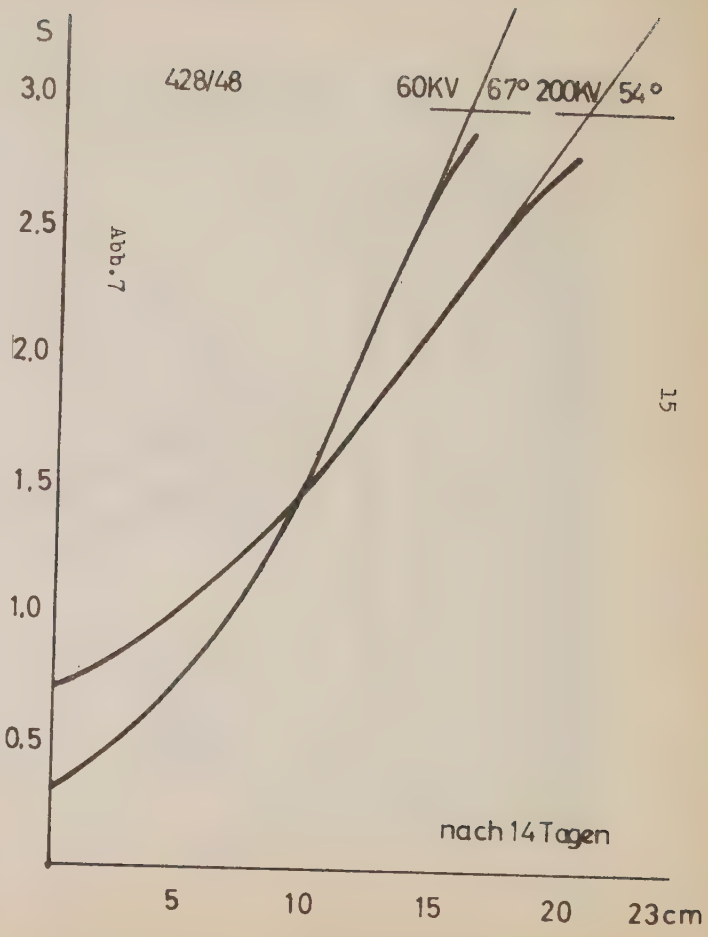

16 cm
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
22 cm
21
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
S
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
60 KV
200 KV
60 KV
200 KV
S
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5

Abb.4


S
428 48
60 KV 67° 200 KV 54°
3.0
2,5
2,0
1.5
1.0
0.5
Abb. 6
nach 10 Tagen
5
10
15
20
23 cm


S
428/ 48
60 KV 67° 200KV 54°
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
Abb. 5
5
10
15
20
23cm


S
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
428 48
60 KV 67° 200KV 54°
Abb. 8
nach 5 Wochen
5
10
15
20
23cm


S
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
428/48
60KV 67° 200KV 54°
Abb. 7
nach 14 Tagen
5
10
15
20
23cm

3. S Konstanz verschiedener Filme mit verschiedenen Verfallsdaten nach 10 Tagen, 15 Tagen und 5 Wochen

Wie der vorhergehende Film wurden an den gleichen Tagen Keilaufnahmen von den Filmen 389/221, 428/69 und 365/056 mit ihren entsprechenden Verfallsdaten gemacht. Auch an ihnen soll ein eventueller Einfluß des Zeitfaktors geprüft werden. (Abb.9,10)

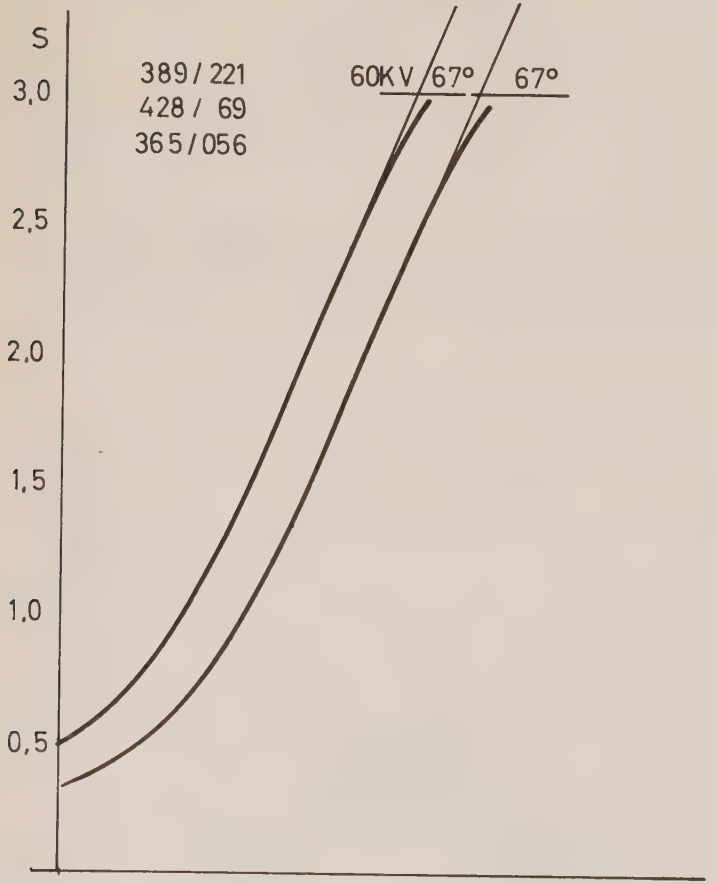


Abb.9

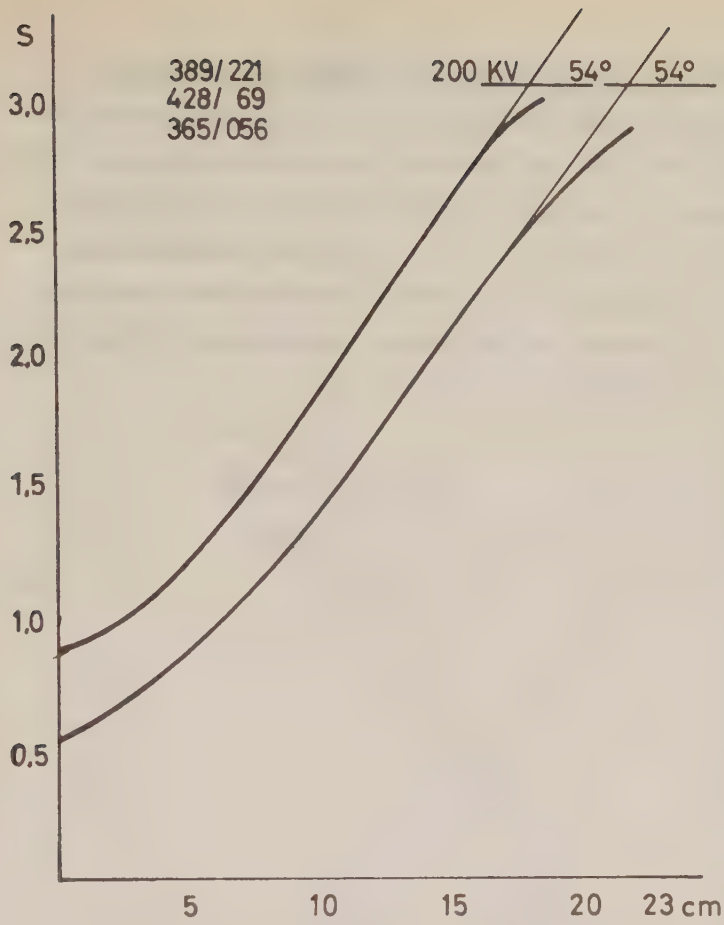


Abb.10

In beiden Abbildungen werden einmal alle Ergebnisse der 60 kV Aufnahmen, das andere Mal die der 200 kV Aufnahmen dargestellt. Da die Kurven teilweise gegeneinander verschoben sind, wurden nur die begrenzenden Kurven gezeichnet, zwischen ihnen liegen alle anderen parallel, also mit dem gleichen Anstieg. Diese Verschiebung hat keinen Einfluß auf den Kontrast der Aufnahmen. Ein Kurvenanstieg von 67° bei 60 kV und 54° bei 200 kV bedeutet, daß keinerlei Änderung der Schwärzungskonstanz vorliegt.

4. S Konstanz von Filmen mit älterem Verfallsdatum

Die Filme 944/53 und 862/44 haben ein Verfallsdatum vom Jan 66 bzw. Sept 65. Es erhebt sich nun die Frage, ob bei den zum Zeitpunkt der Aufnahmen (Dez 65, Jan 66) schon verfallenen Filmen noch eine genügende Schwärzungskonstanz vorhanden ist. Es wurden ebenfalls Aufnahmen des Keils im Abstand von 10 Tagen, 15 Tagen und 5 Wochen gemacht. (Abb.11-13)

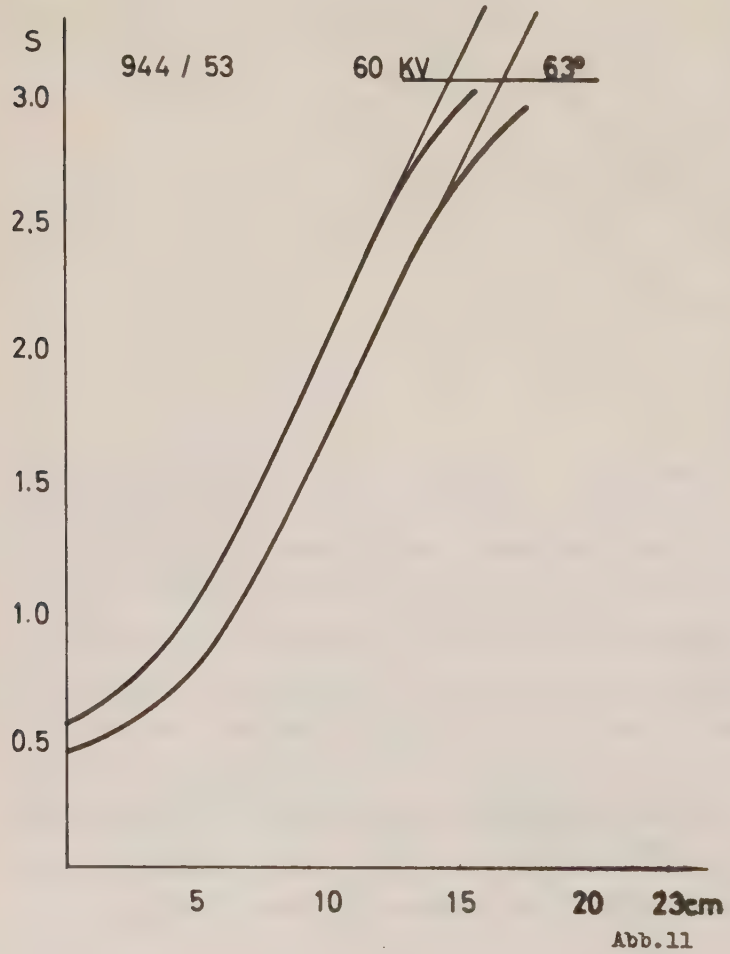


Abb.11

Vom Film 944/53 sind die Ergebnisse der 60 kV Aufnahmen dargestellt. Zwar verlaufen alle Kurven in sich parallel, jedoch ist ihr Anstieg vermindert (63^{o}) und damit der Kontrast: Die Schwärzung ist also gegenüber den anderen Filmen unterschiedlich.

Auch die Auswertung der 200 kV Aufnahmen vom Film 862/44 zeigt einen verminderten Anstieg der Kurven (48^{o}) :ebenfalls keine konstante Schwärzung im Gegensatz zu den übrigen Filmen.

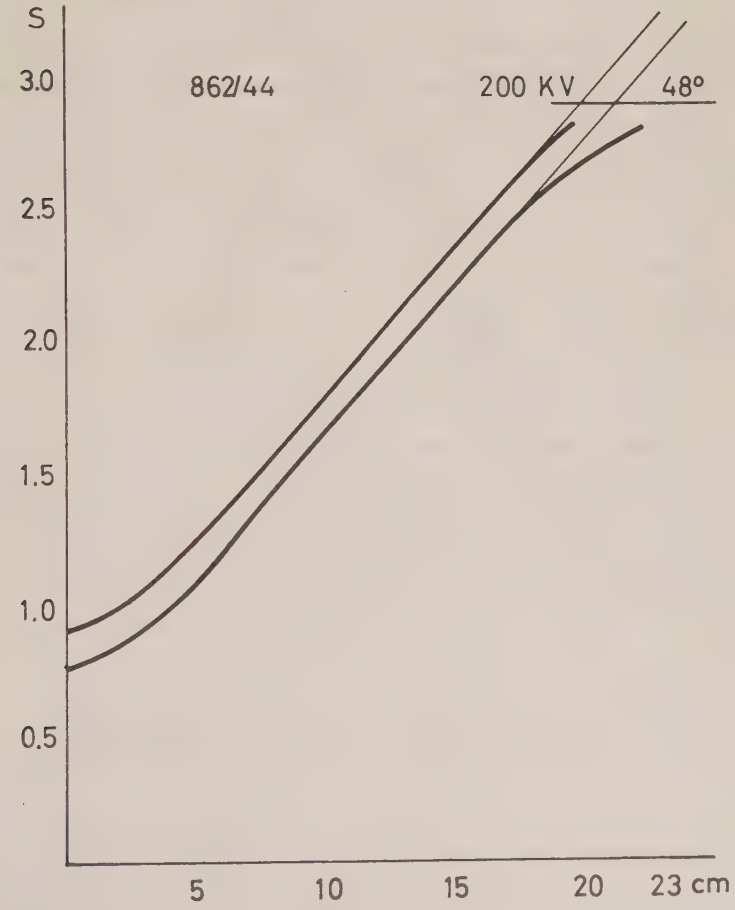


Abb.12

Der Vergleich eines älteren Films mit dem eines jüngeren Datums zeigt den unterschiedlichen Anstieg noch deutlicher. (Abb.13)

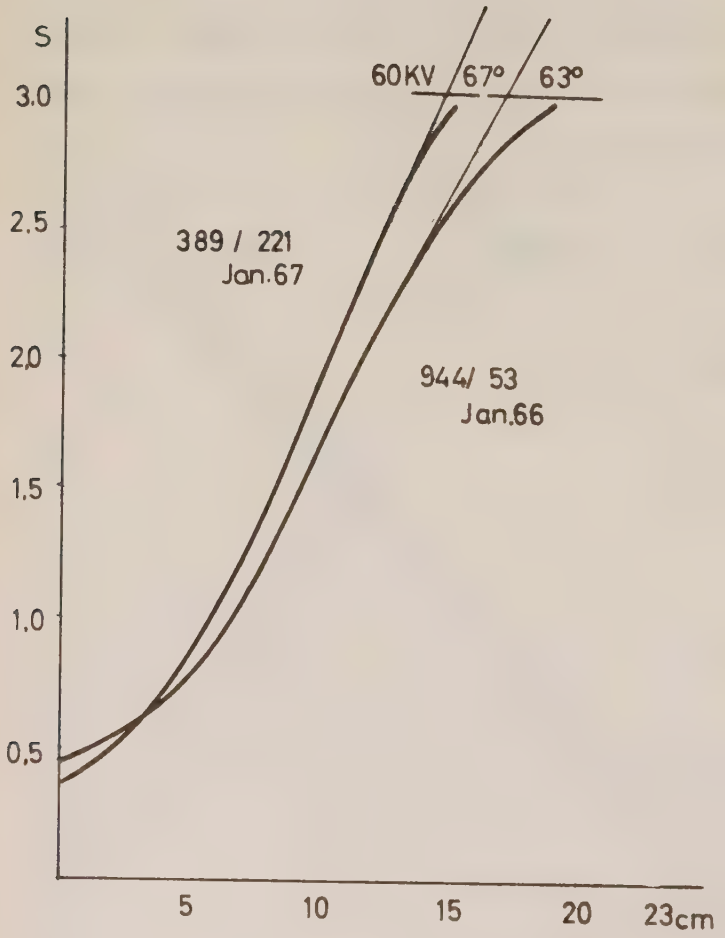
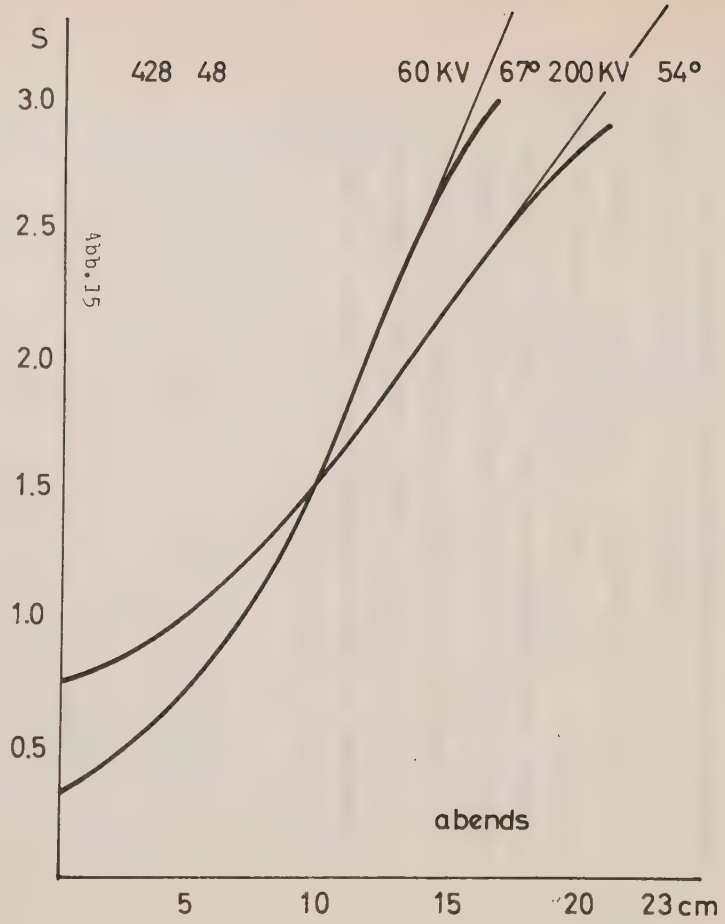
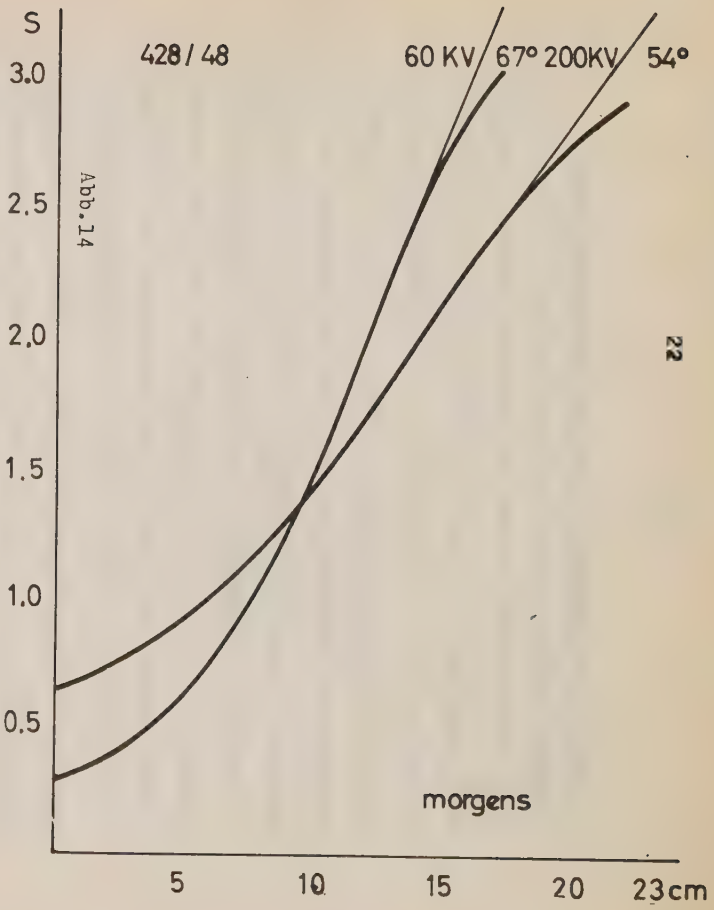


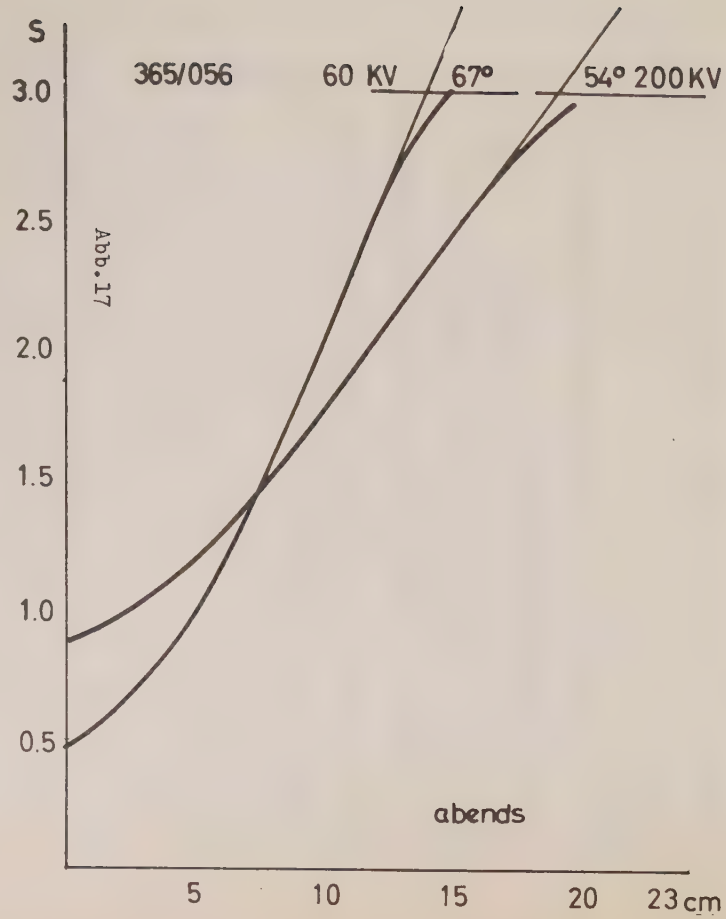
Abb.13

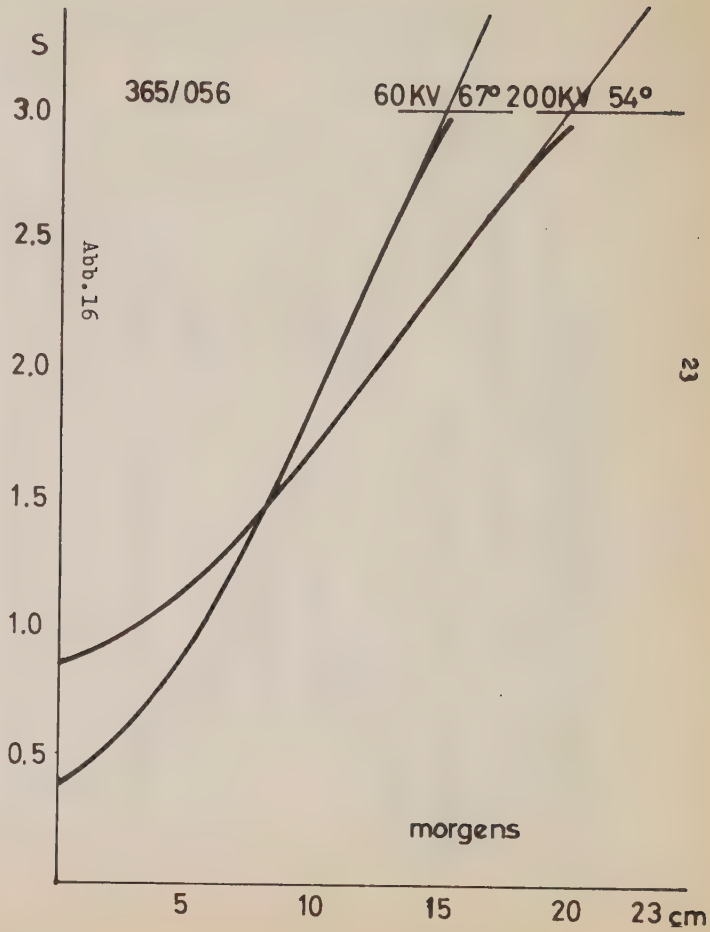
5. Einfluß der Tageszeit auf die Entwicklung von Röntgenfilmen

Alle Filmaufnahmen wurden zur gleichen Tageszeit maschinell entwickelt. Es sollte geprüft werden, ob die Maschine um 8 Uhr, 12 Uhr oder 19 Uhr Aufnahmen unterschiedlicher Schwärzung entwickelt, da sie je nach Tageszeit verschieden belastet ist und damit der Verbrauch an Chemikalien variiert. Dies kann zu Unterschieden führen, ebenso wie eine inkonstante Beschickung mit den Chemikalien eventuell bei An- bzw. Ausschalten der Maschine. Vom Film 428/48 wurden um 19 Uhr je zwei Aufnahmen mit 60 kV und 200 kV belichtet. Davon wurden zwei sofort, die anderen erst am nächsten Morgen um 8 Uhr entwickelt. (Abb.14,15) Beide Abbildungen zeigen, daß von Seiten der Entwicklungsmaschine keine unterschiedlichen Schwärzungen entstehen: Sowohl um 19 Uhr als auch um 8 Uhr ist der Kurvenanstieg bei der 60 kV Aufnahme 67°, bei der 200 kV Aufnahme 54°. Der gleiche Versuch wurde mit den Filmen 365/056 durchgeführt: zwei Aufnahmen bei 60 kV bzw. 200 kV wurden um 19 Uhr belichtet und entwickelt, am nächsten Morgen um 8 Uhr zwei weitere ebenfalls belichtet und entwickelt. (Abb.16,17) Auch diese Kurven lassen keinen Unterschied gegenüber den anderen Ergebnissen erkennen: Anstieg bei 60 kV 67°, bei 200 kV 54°.


S
428 48
60 KV 67° 200 KV 54°
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
Abb.15
abends
5
10
15
20
23 cm


S
428 / 48
60 KV 67° 200KV 54°
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
Abb.14
morgens
5
10
15
20
23 cm


S
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
365/056
60 KV
67°
54° 200 KV
Abb.17
abends
5
10
15
20
23 cm


S
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
365/056
60 KV
67°
200 KV
54°
Abb.16
morgens
5
10
15
20
23 cm

6. S Konstanz von Filmen anderer Fabrikate

Die bisherigen Versuchsreihen wurden mit Kodakfilmen durchgeführt. Ob eine Konstanz der Schwärzungen bei Aufnahmen mit anderen Filmfabrikaten vorliegt wurde an folgenden Filmsorten untersucht:

Agfa Gaevert	R 24290271 L
Agfa Gaevert	25330421 T
Agfa Gaevert	25240003
Agfa Gaevert	25230271
Agfa	7012/272

Bei dem Agfa Gaevert Spezialfilm R 24290271 L handelt es sich um einen Film von besonders langer Lagerungsdauer. Mit bekannter Versuchsanordnung wurden an drei Tagen Keilaufnahmen bei 60 kV und 200 kV gemacht. Die Kurven der 60 kV Aufnahmen sind wiederum in einer Abbildung, die der 200 kV Aufnahmen in einer weiteren zusammengefaßt. (Abb.18,19)

Die Kurven haben wie die übrigen Filme Anstiege bei 60 kV von 67° und bei 200 kV von 54°.

An zwei Tagen wurden von den Filmen 25330421 T, 25240003, 25230271 Keilaufnahmen bei 60 kV und 200 kV gemacht. Alle Ergebnisse sind in den beiden Abbildungen eingetragen (Abb.20,21). Es ergibt sich ebenfalls kein Schwärzungsunterschied, da der Kurvenanstieg 67° bzw. 54° beträgt.

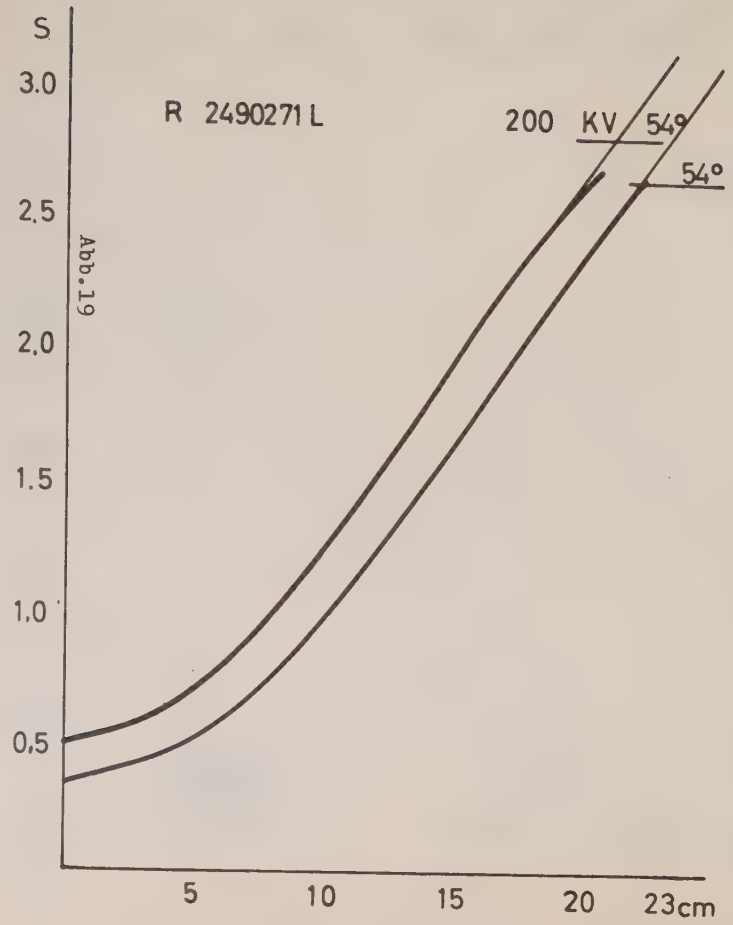

S
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0,5
R 2490271 L
200 KV
54°
54°
5
10
15
20
23cm

Abb.19

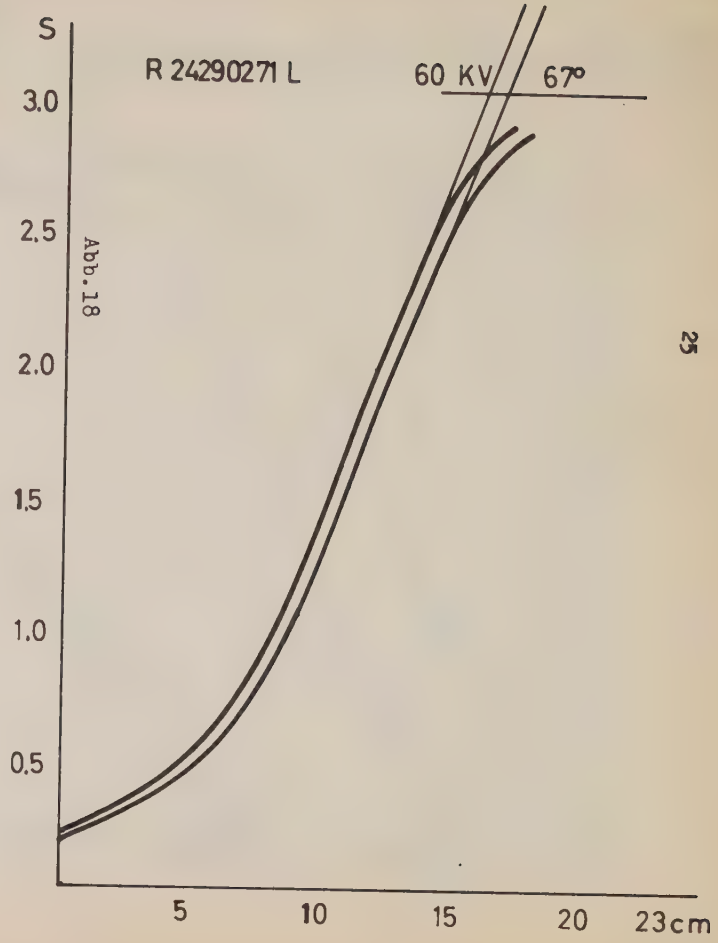

S
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
R 24290271 L
60 KV
67°
5
10
15
20
23cm

Abb.18

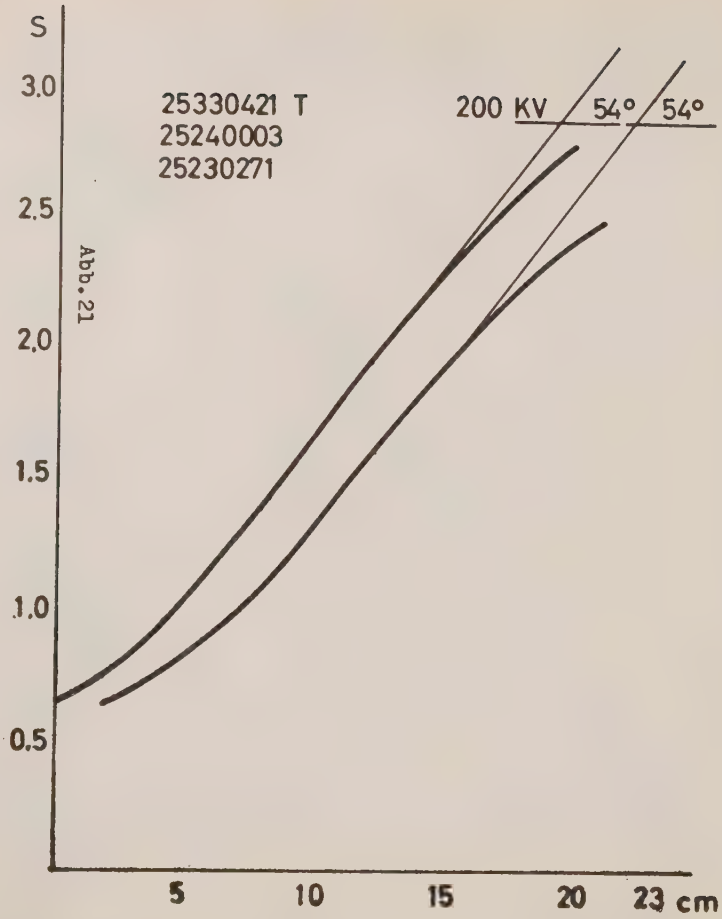

S
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
25330421 T
25240003
25230271
200 KV
54°
54°
5
10
15
20
23 cm

Abb. 21

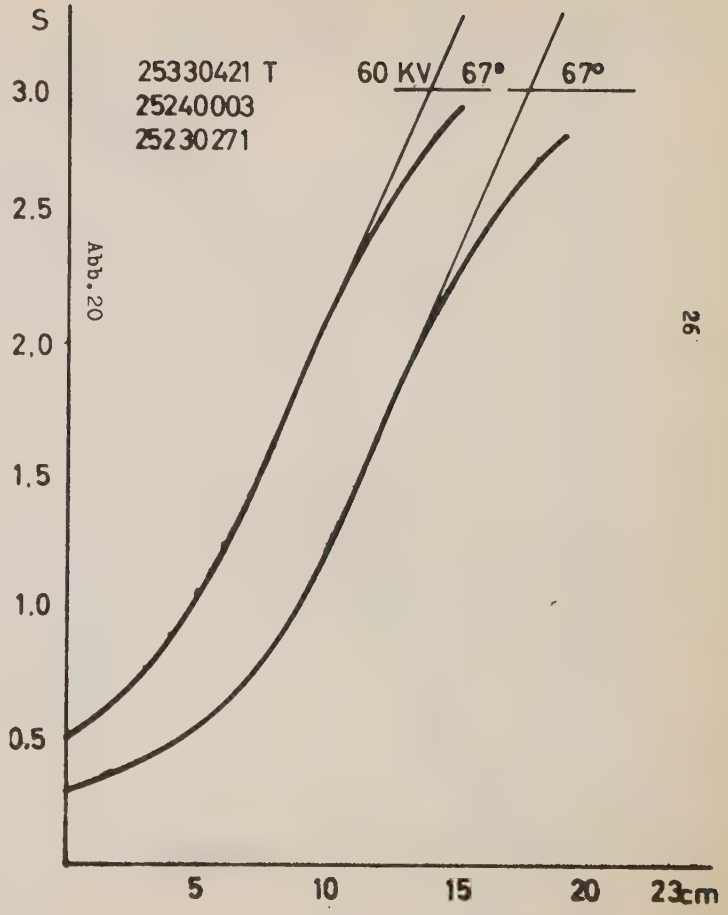

S
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
25330421 T
25240003
25230271
60 KV
67°
67°
5
10
15
20
23cm

Abb. 20

Der Agfa Film 7012/272 mit dem Verfallsdatum Dez 65 zeigt wie die schon verfallenen Kodakfilme einen verminderten Anstieg der Kurven. Es handelt sich auch hier um einen älteren Film, der nicht mehr über einen gleichstarken Kontrast verfügt, wie die Vergleichsfilme. (Abb.22)

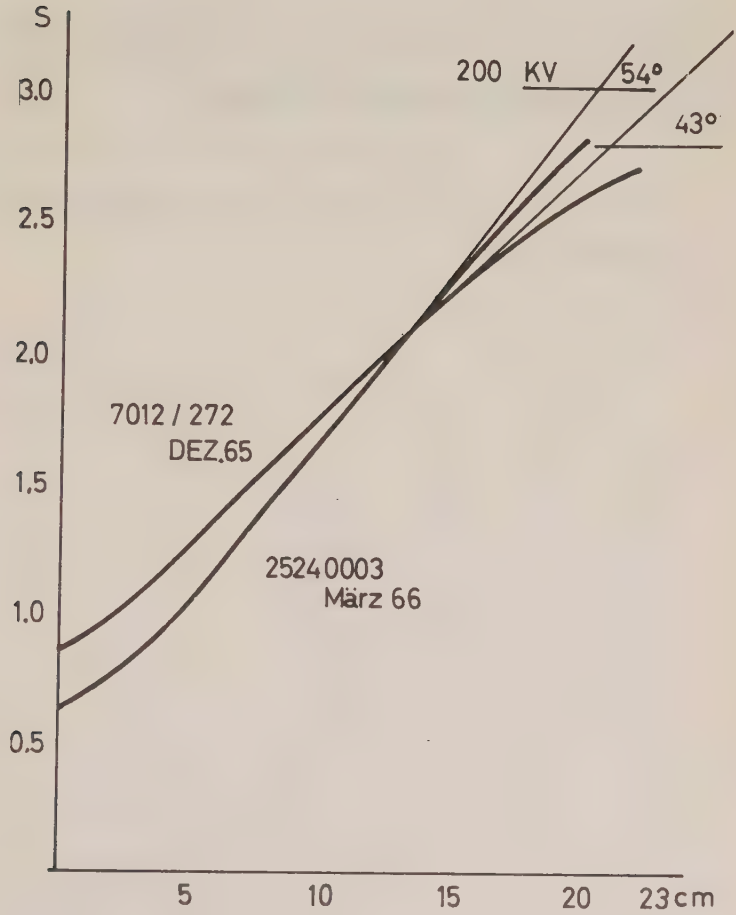


Abb. 22

Zusammenfassung

Eine Schwärzungskonstanz markt-gängiger Filmfabrikate für die vergleichende Absorptionsmessung ist vorhanden. Die Filmaufnahmetechnik, maschinelle Entwicklung und fotometrische Auswertung führen zu keinen unterschiedlichen Ergebnissen. Es müssen jedoch Filme benutzt werden, die noch innerhalb der angegebenen Verwendungszeit liegen, da sie sonst eine Kontrastverminderung zeigen und somit Fehler in der Auswertung verursachen.

Bestimmung des Querdurchmessers des 4. LWK in Abhängigkeit von Lebensalter und Geschlecht

Da bei der Bestimmung des K-Faktors für die Rechnung der Querdurchmesser des jeweiligen Knochens benötigt wird, muß z.B. bei der Wirbelsäule eine zusätzliche a. p. Aufnahme gemacht werden. Hier soll geprüft werden, wie groß die Unterschiede des Querdurchmessers in Beziehung zum Alter und Geschlecht sind. Auf 200 Aufnahmen der LWS (Film-Fokusabstand der verwendeten a.p.-Aufnahmen 100cm) verschiedenen Geschlechts und verschiedener Altersgruppen wird jeweils der Querdurchmesser des 4. LWK gemessen.

Querdurchmesser des 4. LWK in cm

Maximalwert: +
Minimalwert: -
Mittelwert : Mw.
Streubreite: Stb.

Altersgruppe	Männer		Frauen	
0-5 Jahre	2,2 -	2,8	2,6	2,2
	2,7	2,7	2,6	2,5
	2,7	3,0	2,8	2,3
	3,0	2,7	2,5	3,0
	2,4	3,0	2,1 +	2,7
	2,6		2,6	2,3
	3,2		3,0 -	2,1
	3,2 +		2,3	2,6
Mw:	2,78		2,51	
Stb:	2,2 - 3,36		1,95 - 3,0	
5-10 Jahre	3,6		3,5 -	3,7
Mw:	3,9		3,8	3,7
Stb:	3,2 - 4,4		4,3 +	

Altersgruppe	Männer		Frauen	
10-15 Jahre	4,8		4,3 -	
	4,8		4,5 +	
	5,0 +		4,3	
	4,4 -		4,4	
	4,5			
Mw:	4,7		4,37	
Stb:	4,1 - 5,3		4,2 - 4,6	
15-20 Jahre	5,7 +	5,4	4,4 -	
	5,4	5,4	4,4	
	4,8 -	5,0	4,8 +	
	5,2	5,0	4,6	
Mw:	5,23		4,55	
Stb:	4,6 - 5,8		4,2 - 4,9	
20-30 Jahre	5,0	5,8	4,4	4,5
	5,2	4,5	4,8	4,6
	5,2	4,9	4,8	4,7
	5,3	5,5	4,7	4,8
	4,8	5,3	4,9	5,1 +
	5,0	4,9	4,6	4,3 -
	5,4	5,7	4,7	
	5,2	5,7	4,5	
	5,2	5,9 +	4,6	
	5,1	4,9	4,5	
	5,0	4,4 -	4,9	
Mw:	5,17		4,67	
Stb:	4,4 - 5,9		4,3 - 5,1	

Altersgruppe	Männer		Frauen	
30-40 Jahre	4,9	5,3	4,7	5,2 +
	5,6 +	5,4	4,2 -	4,8
	5,1	4,6 -	4,5	4,5
	5,4	5,0	5,0	4,4
	5,2			
Mw:	5,16		4,66	
Stb:	4,5 - 5,8		4,0 - 5,3	
40-50 Jahre	5,3		4,5	4,6
	5,0 -		4,7	4,7
	5,7 +		4,5	4,9
	5,0		5,0	4,7
			4,7	4,8
			4,7	4,7
			4,8	5,0
			5,3 +	4,4 -
Mw:	5,25		4,75	
Stb:	4,6 - 5,9		4,3 - 5,2	
50-60 Jahre	4,8	5,3	4,7	4,6
	5,5	5,3	4,6	4,5
	5,0	4,7	4,8	4,9
	5,3	5,1	4,8	4,4 -
	5,0	4,5 -	4,5	4,5
	5,8	5,9 +	4,8	5,0
	5,5	5,3	4,5	4,8
			4,8	
Mw:	5,21		4,68	
Stb:	4,4 - 6,0		4,3 - 5,0	

Altersgruppe	Männer		Frauen	
60-70 Jahre	4,5 -	5,4	4,6	4,5
	5,2	5,7	4,7	4,9
	5,3	5,9 +	4,3 -	4,4
	5,7	5,5	4,5	4,9
	5,5	5,1	4,3	4,7
	5,8	5,4	5,0	4,9
	5,6		5,2 +	4,6
Mw:	5,43		4,67	
Stb:	4,7 - 6,2		4,1 - 5,2	
70-80 Jahre	5,1		4,9	4,9
	5,4 +		4,8	4,7
	4,7 -		4,5 -	4,9
			5,0 +	4,8
Mw:	5,06		4,81	
Stb:	4,4 - 5,8		4,5 - 5,1	

An Hand der graphischen Darstellung ergibt sich für das männliche Geschlecht (Abb.23) vom 25. Lebensjahr an ein mittlerer Querdurchmesser des 4. LWK von 5,2cm, für das weibliche Geschlecht (Abb.24), ebenfalls vom 25. Lebensjahr an, ein Wert von 4,7cm.

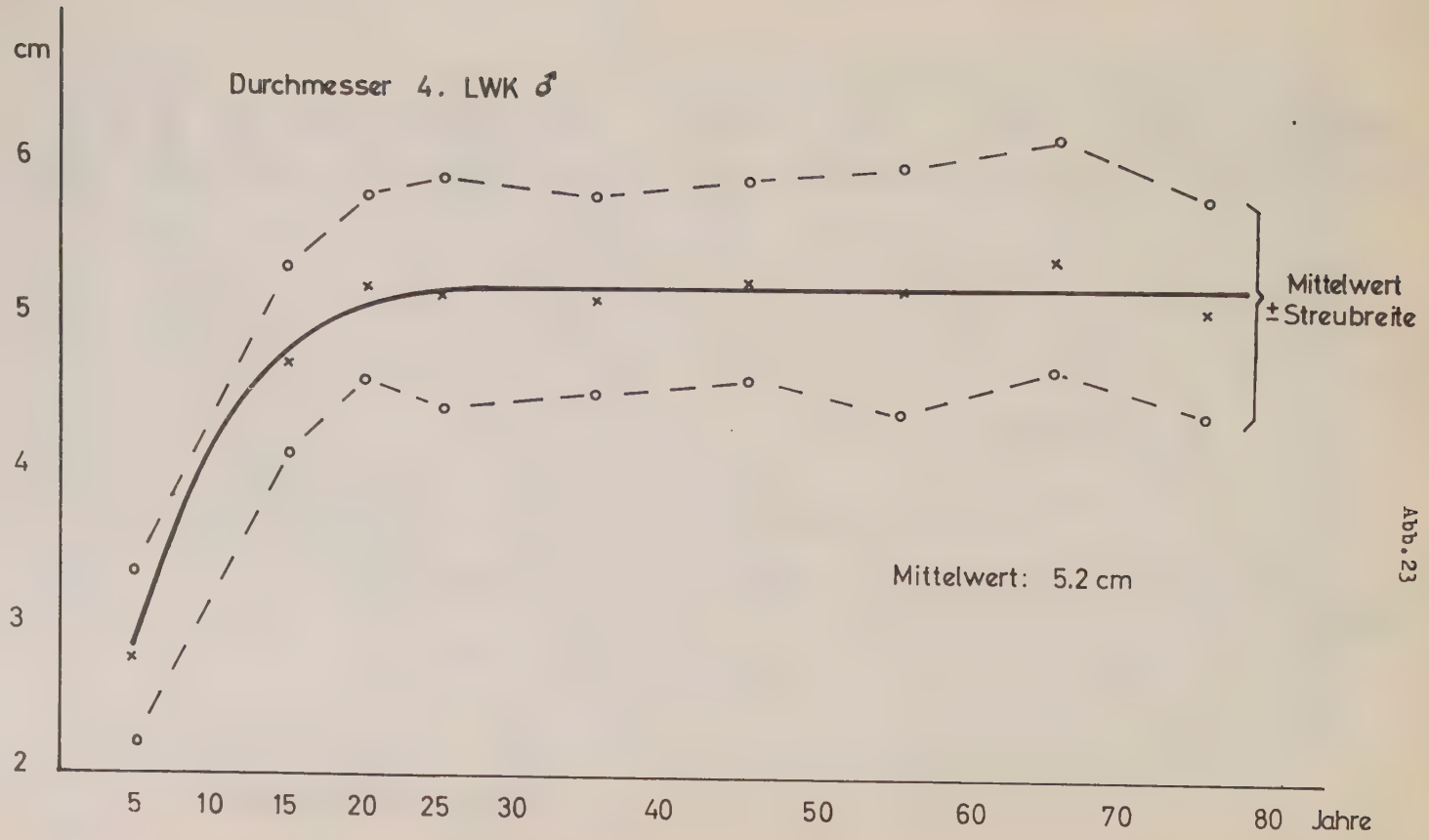

cm
Durchmesser 4. LWK ♂
6
5
4
3
2
Mittelwert
± Streubreite
Mittelwert: 5.2 cm
5
10
15
20
25
30
40
50
60
70
80
Jahre

Abb. 23

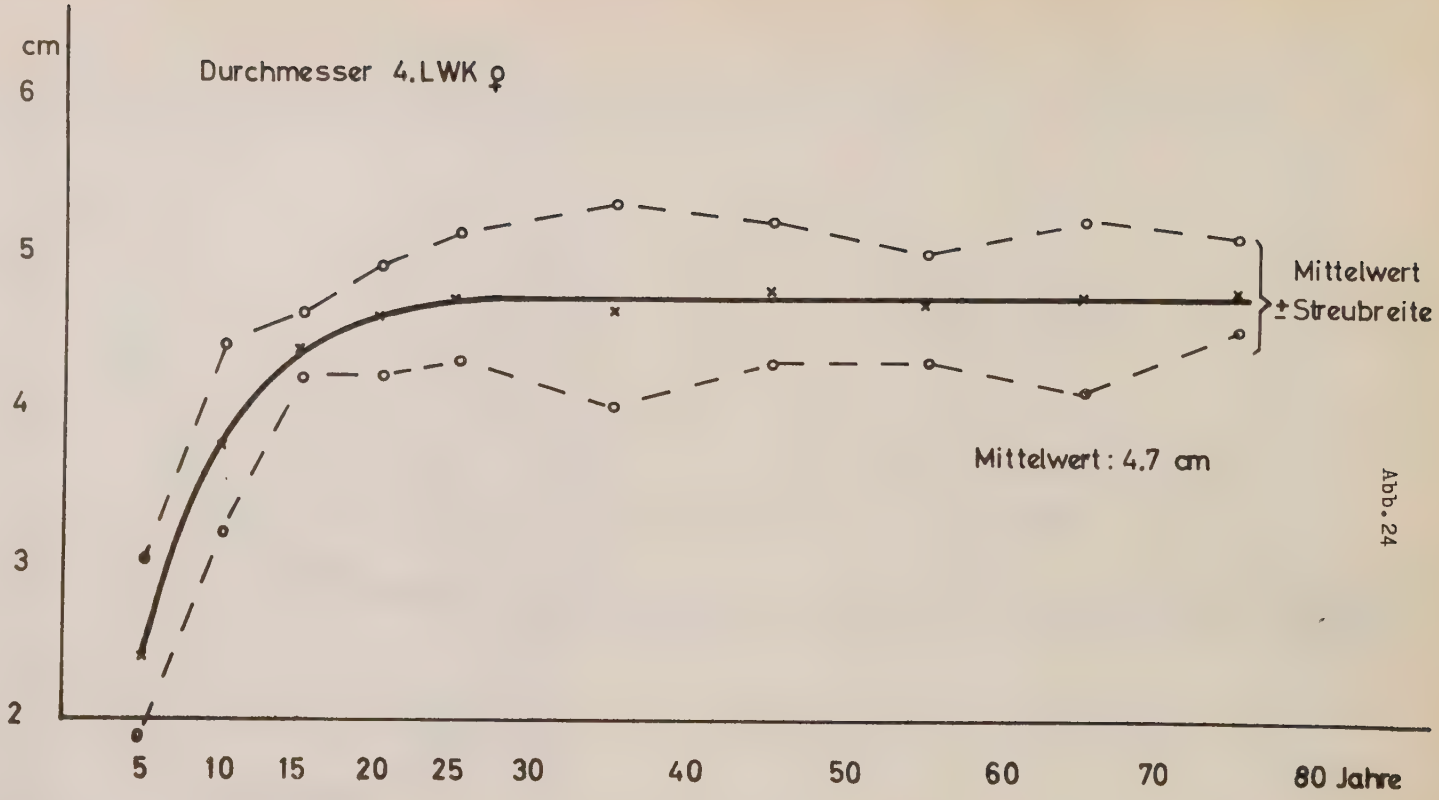

cm
6
5
4
3
2
Durchmesser 4.LWK ♀
Mittelwert
± Streubreite
Mittelwert : 4.7 cm
5
10
15
20
25
30
40
50
60
70
80 Jahre

Abb. 24

Röntgenologische Untersuchung autoptisch gewonnener Lendenwirbel zur Berechnung des K-Faktors

Die Bestimmung des K-Faktors an Brust- und Lendenwirbelsäule mit anschließend chemisch-analytischer Calciumbestimmung wurde bereits in größerem Umfang am hiesigen Strahleninstitut durchgeführt (28). Eine neue Bestimmung wurde notwendig, da nicht mehr mit den Werten von 250 kV und 62 kV sondern mit 200 kV und 60 kV gearbeitet wird. Damit ist eine röntgenologische Calciumbestimmung auch an Krankenhäusern möglich, die kein Therapiegerät haben, zumal das 200 kV Röntgendiagnostikgerät für Hartstrahlaufnahmen (Super 100 mit speziellem Generatortyp) der Firma CHF Müller zur Verfügung steht. Beide Aufnahmen können ohne Umlagerung des Patienten angefertigt werden. Vom Pathologischen Institut der Freien Universität Berlin (Direktor: Prof. Dr. W. Maßhoff) wurden autoptisch gewonnene Lendenwirbelkörper zur Verfügung gestellt. Diese werden in einem Plexiglasgefäß mit 20cm Wasser als "Weichteilkörper"aufgenommen. Sie sind so an zwei Drähten aufgehängt, daß sie sich in der Mitte des Beckens befinden.

Aufnahmedaten

60 kV	Fokusabstand	90cm
	Belichtungszeit	1,6sec
	Filter	1mm Al
200 kV	Fokusabstand	90cm
	Belichtungszeit	0,4sec
	Filter	6mm Cu

Kodakfilme aus dem Tagesbedarf

Folien	feinkorn	(Cawo)
Entwicklung	maschinell mittels X - Omat	(Kodak)

Mit den gleichen Daten wird das Plexiglasphantom aufgenommen. Die Schwärzungswerte des Wirbelkörpers werden auf dem Röntgenfilm fotometrisch bestimmt, der Weichteilwert, in diesem Fall Wasser, ebenfalls und zwar unmittelbar neben dem Wirbelkörper. Diese beiden Schwärzungswerte werden auf der Phantomaufnahme fotometrisch aufgesucht und so die Schwächungsgleichwerte (SGW) gefunden. Um dieses doppelte Fotometrieren und damit verbundene Ungenauigkeiten zu umgehen, werden von den Phantomaufnahmen Eichkurven, ähnlich solchen der vorausgegangenen Filuntersuchungen, angelegt. Aus diesen Eichkurven ist der entsprechende SGW sofort ablesbar. (Abb. 25)

Eine weitere Vereinfachung ist die Einführung des konstanten Faktors für den jeweiligen Durchmesser eines Wirbelkörpers (Untersuchungsreihe siehe dort). Dadurch entsteht eine Fehlerbreite, die um 2% bis 3% liegt und nur im Extremfalle 5% erreicht.

Die Bestimmung des K-Faktors an autoptisch gewonnenen Lendenwirbeln wird in folgender Reihenfolge vorgenommen:

1. Aufnahme des LWK im Wasserbecken bei 60 kV und 200 kV
2. Fotometrische Bestimmung der Schwärzungswerte bei 60 kV und 200 kV für Weichteil und Weichteil plus Knochen.
3. Bestimmung der Schwächungsgleichwerte mit Hilfe der Eichkurve
4. Der Schwächungsgleichwert des Weichteils wird subtrahiert, so daß der Schwächungsgleichwert des Knochens übrigbleibt

5. Zum Schwächungsgleichwert des Knochens wird bei 60 kV und 200 kV der Faktor für den Querdurchmesser hinzuaddiert und beide Werte dividiert. Es resultiert der K-Faktor des Knochens.

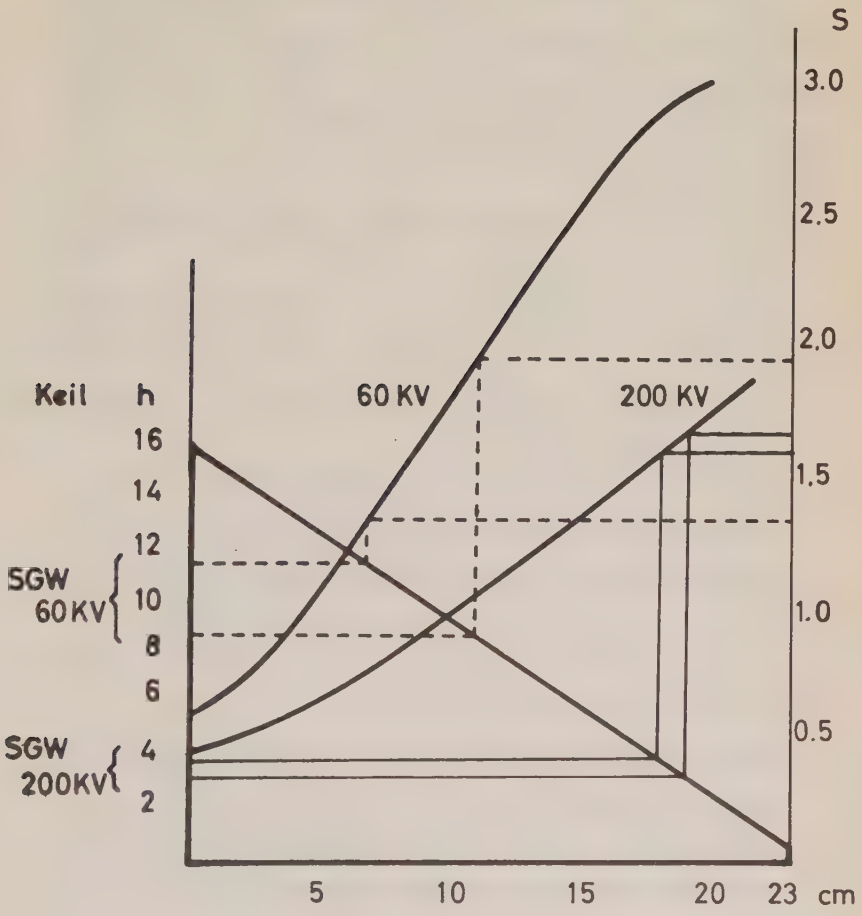


Abb. 25

Chemisch-analytische Untersuchung der LWK

Nach der röntgenologischen Untersuchung der Knochen zur Ermittlung des K-Wertes wurde der Knochen chemisch analytisch im Institut für klinische Chemie unter Leitung von Prof. Dr. J. Dulce untersucht, um den gefundenen röntgenologischen Relativwert in ein absolutes Maß zu überführen. Ziel der Untersuchung war es, den Ca - Gehalt in mg pro ml Knochen zu bestimmen (14,15).

Untersuchungsgang

1. Zunächst wird das Frischgewicht bestimmt und anschliessend wird der Knochen
2. mit Hilfe der Gefriertrocknung getrocknet. (Der Knochen wird 1/2 Stunde in flüssiger Luft eingefroren und danach 2 Stunden im Exsikator über Silicagel getrocknet und über Nacht stehengelassen).
3. Erneute Gewichtsbestimmung (Trockengewicht) und
4. Entfetten mit einem Aether - Aceton Gemisch von 1 : 1
5. Unter Vacuum wird Aether - Aceton wieder entfernt und
6. das Gewicht kontrolliert (fettfreies Trockengewicht)
7. Trocknung (Gefriertrocknung)
8. Gewichtsbestimmung
9. Dann wird der Knochen zerkleinert und zwar unter flüssiger Luft, damit durch die Hitzeentwicklung bei der Zerkleinerung, die mit einer Bohrmaschine vorgenommen wird, keine organische Substanz verlorengeht.
10. Das Knochenpulver wird eingewogen (10mg Knochenpulver in 2ml 4n HCL), in einem Bombenrohr eingeschmolzen (Duranglas) und 20 Stunden bei 100^{o} hydrolysiert.

Danach ad 10ml aqua tridest aufgefüllt und auf 1/50 verdünnt. Zur Sicherung werden Doppeleinwaagen gemacht.

11. Die Calciumkoncentration wird dann photometrisch bestimmt: Ca wird quantitativ an Murexid zu einem violetten Farbstoff gebunden. Durch Titration mit Titriplex 3 Lösung (Ähtylendiamin tetraessigsäure) bekannter Konzentration, die Ca stöchiometrisch gelatartig bindet, werden dem Ca Murexid die Ca Ionen wieder entrissen. Sind alle Ca Ionen an Titiplex gebunden, schlägt die Farbe von violett nach rot um. Dieser Umschlagpunkt wird fotometrisch bestimmt, und zwar mit Hilfe einer graphischen Darstellung: man trägt die Lösung auf der Ordinate gegen Titriplex auf der Abszisse auf. Aus den Meßwerten resultieren zwei im stumpfen Winkel zueinander stehende Geraden, deren Schnittpunkt der Aequivalenzpunkt der Titration ist. (zitiert aus: Siegmund P., H. J. Dulce, Zur Biochemie der Knochenauflösung)

Ergebnisse (Abb.27)

Alter	51	73	65	61
Frischgewicht	23,77	22,98	19,78	16,91
Trockengewicht	16,52	15,83	13,80	9,82
Fettfreies Tr.Gew.	11,08	9,26	7,77	7,53
Calcium% Tr.Gew.	15,5	16,6	17,7	19,4
Apatit% Tr.Gew.	38,84	41,59	44,60	48,61
Apatit mg/ml Fr.Gew.	271	291	312	340
K - Wert	1,23	1,29	1,33	1,42

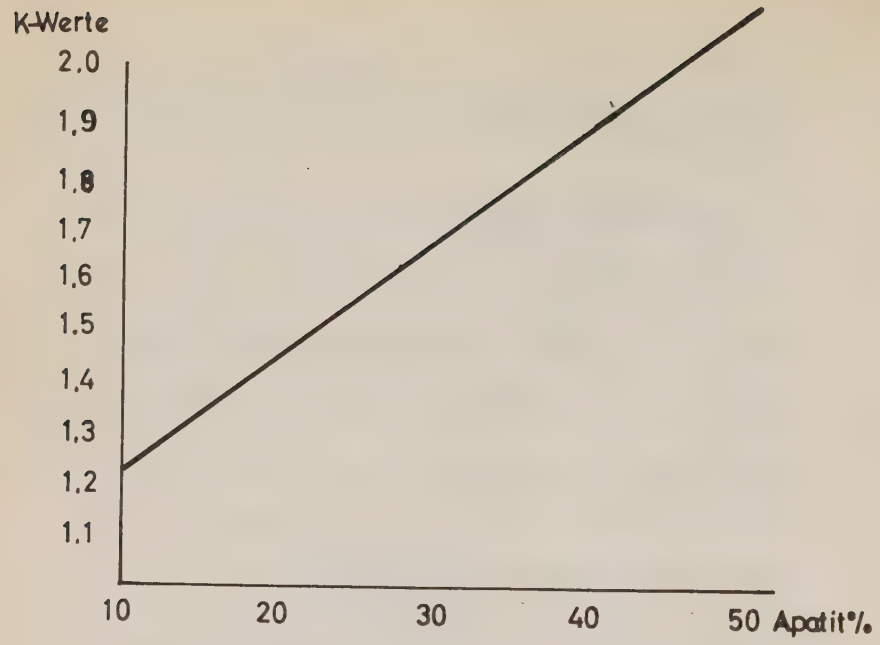

K-Werte
2.0
1.9
1.8
1.7
1.6
1.5
1.4
1.3
1.2
1.1
10
20
30
40
50 Apatit%

Abb. 26

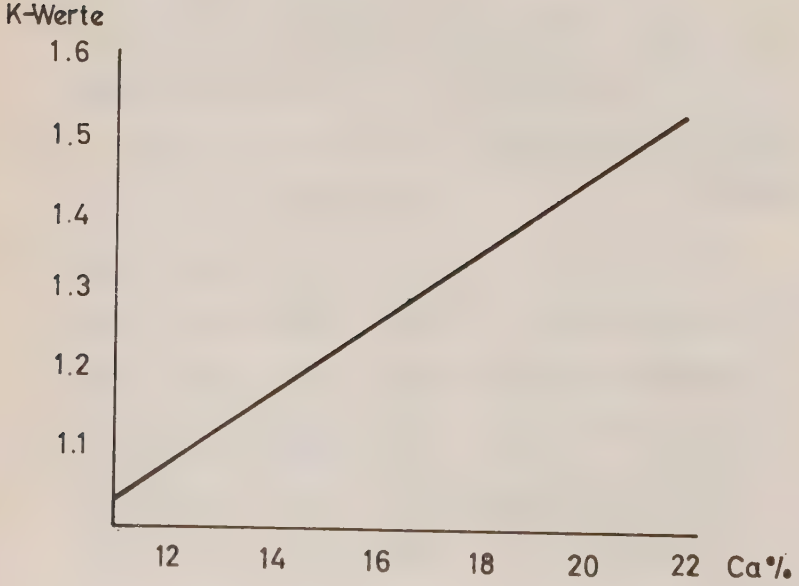

K-Werte
1.6
1.5
1.4
1.3
1.2
1.1
12
14
16
18
20
22 Ca%

Abb. 27

Diskussion

Aus der oben angegebenen Arbeit von P. Strug ist ersichtlich, daß das Verhältnis der K-Faktoren zu den entsprechenden chemischen Werten linear ist (Abb.26). Diese Gerade war mit den geänderten Daten neu festzulegen (Abb.27). Hierzu muß bemerkt werden, daß auf Grund der verminderten Spannungsdifferenz (200 kV zu 60 kV im Gegensatz zu 250 kV und 62 kV) ebenfalls die Skala der K-Werte verkleinert ist und somit geringe Unterschiede der K-Werte größere Unterschiede des Calciumgehaltes angeben.

Aus dem chemisch - analytisch gefundenen

1. Calciumgehalt in mg% Knochentrockengewicht wurde mit Hilfe der Summenformel $Ca_5(PO_4)_3OH$ und dem zugehörigen Molekulargewicht von 502,31 der
2. Apatitgehalt in % Knochentrockengewicht ermittelt und dieser Apatitgehalt wiederum in
3. mg Apatit pro ml Knochenfrischgewicht angegeben.

Mg pro ml Knochen ist eine Bezeichnung, die von allen europäischen Autoren (z.B. Spiegler,Heuck,Engström) verwendet wird. Besser wäre es den Begriff Hydroxylapatit in mg pro ml Knochen durch den Calciumgehalt in Prozent zu ersetzen. Folgende Gründe sprechen dafür:

1. Den Kliniker interessieren in erster Linie der Calciumgehalt im Skelettsystem.
2. Calcium liegt im Knochen nicht nur als Hydroxylapatit vor
3. Mit der Absorptionsmessung wird vor allem Calcium auf Grund seiner hohen Ordnungszahl bestimmt.
4. Die Umrechnung des Calciumprozentgehaltes in Apatit pro ml Knochen ist wegen des schwer zu bestimmenden Frischgewichts mit Fehlern verbunden.

Nomogramm

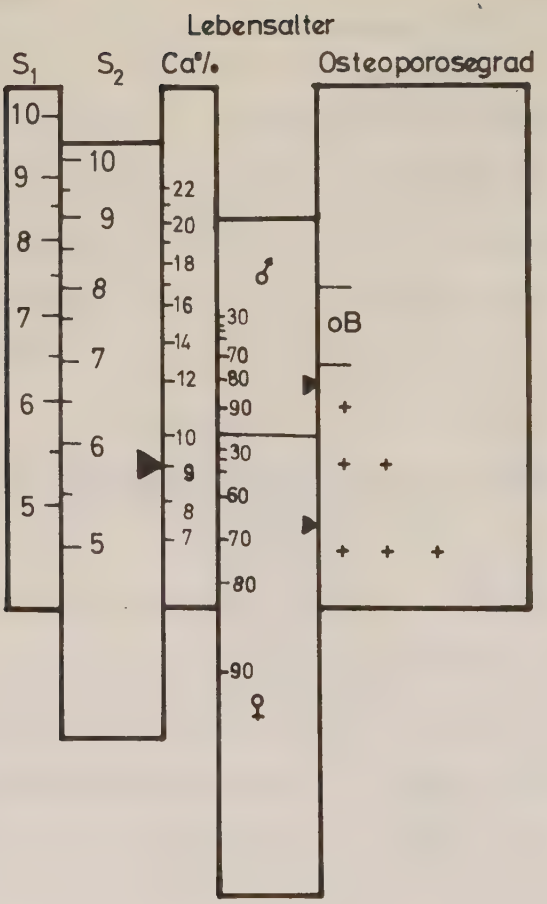


Abb. 28

Aus den Werten S_1 (SGW bei 60 kV) und S_2 (SGW bei 200 kV) resultiert der Calciumgehalt in mg%. Stellt man das Lebensalter des Patienten auf den gefundenen Calciumwert ein, ist auf der letzten Skala der Befund abzulesen (o. B. bzw. Grad der Osteoporose)

Fall

Zur Anwendungsmöglichkeit der quantitativen Absorptionsmessung sei hier kurz ein Fall angeführt. Bei einer 36 jährigen Patientin mit linksseitigem Mammakarzinom traten zwei Jahre nach der Operation Schmerzen im Bereich des Beckens auf. Die Rö. Aufnahme ergab eine ausgedehnte Destruktion in Höhe des 3. LWK. Querfortsatz und Bogenwurzel rechts kamen nicht mehr zur Darstellung. Eine Calciumbestimmung mit Hilfe der quantitativen Absorptionsmessung läßt eine deutliche Verminderung des normalen Calciumgehaltes erkennen. (Normalgehalt ist in der Zeichnung durch den gestrichelten Bereich angegeben) Nach einer Röntgenbestrahlung ergaben neue Bestimmungen, daß der Calciumgehalt langsam wieder zur Norm anstieg. Ein nochmaliger Abfall besserte sich unter weiterer Bestrahlung, wie laufende Kontrollen des Calciumgehaltes zeigten. Deutliche Parallelität also zwischen dem makroskopischen Rö.-Befund und der Recalcifizierung und somit die Beobachtungsmöglichkeit vom Verlauf und Therapieerfolg. (Abb. 29)

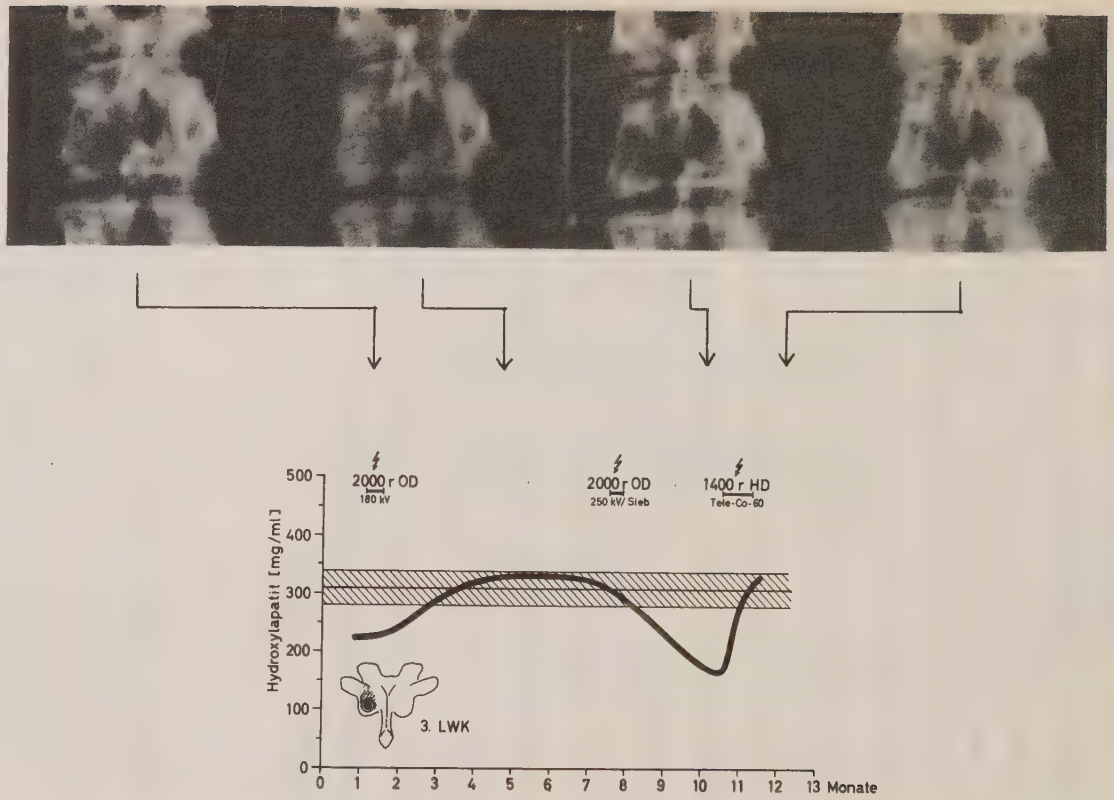


Abb. 29 Recalzifizierung einer osteolytischen Metastase bei Mammakarzinom nach lokaler Strahlenbehandlung.

Zusammenfassung

Die röntgenologische Mineralsalzbestimmung, insbesondere der Wirbelsäule mittels differenter Strahlenqualitäten wurde erklärt und ein Überblick über andere Methoden dieser Bestimmung gegeben. Zur Klärung eventueller Fehler durch die Filmkomponente im Zusammenhang mit Material, Aufnahmetechnikund Entwicklung wurden Versuche mit einem Plexiglaskeil durchgeführt und an Hand von graphischen Darstellungen erläutert und bewiesen, daß eine notwendige Konstanz der Filmschwärzungen unter verschiedenen Bedingungen vorhanden ist.

Zur Vereinfachung der rechnerischen Auswertung wurde aus 200 Messungen des 4. LWK ein konstanter Faktor für den Querdurchmesser desselben bestimmt, der eine zusätzliche Aufnahme des Knochens überflüssig macht.

Die Bestimmung des Absolutwertes des K-Faktors wurde mit neuen röntgenologischen Daten an Hand von autptisch gewonnenen LWK erneut durchgeführt, mit anschließend chemisch-analytischer Untersuchung des Knochens.

Es wurde ein Nomogramm konstruiert, mit dessen Hilfe der Calciumgehalt und der Befund für das entsprechende Lebensalter und Geschlecht direkt ablesbar ist.

Zur praktischen Anwendbarkeit wurde ein Fall dargestellt. Es wurde gezeigt, daß die Methode der vergleichenden Absorptionsmessung ein ausreichendes und nur mit geringer Fehlerbreite behaftetes Verfahren ist, um in jeder Klinik Veränderungen des Skelett-Calciumgehaltes festzustellen.

Literatur

1 Krokowski, E.:
Die Absorption von Röntgenstrahlen im Knochen
Fortschr. Röntgenstr. 91 (1959), 76

2 Krokowski, E., W. Sclungbaum:
Objektivierung der Diagnose 'Osteoporose' röntgenologisch
Fortschr. Röntgenstr. 91 (1959) 740

3 Krokowski, E., H. Steiner:
Röntgenologische Bestimmung des Kalziumgehaltes im menschlichen Skelett
Med. Klinik 49 (1961), 2073

4 Krokowski, E.:
Die typische Radiusfraktur
Schweiz. med. Wschr. 92 (1962), 1120

5 Krokowski, E.:
Quantitative Verlaufsbeobachtung der Kalziumveränderung im Knochen mittels röntgenologischer Substanzanalyse
Fortschr. Röntgenstr. 100 (1964), 359

6 Krokowski, E.:
Traumatische und osteoporotische Wirbelfraktur quantitativ beurteilt
Fortschr. Röntgenstr. 101 (1964), 190

7 Krokowski, E.:
Röntgenologische Analyse - Technik zur Bestimmung des Calciumgehaltes im Knochen
Medizinalmarkt 1965

8 Krokowski, E.:
11. Int. Kongress Radiologie, Rom 1965

9 Krokowski, E.:
Quantitative röntgenologische Bestimmung des Skelett - Calciumgehaltes
71. Tg. Dsch. Gesell. innere Medizin 1965

10 Oeser, H., E. Krokowski:
Röntgenstrahlen zur visuellen Knochenbiopsie zwecks Bestimmung des Mineralgehaltes
Dtsch. med. Wschr. 86 (1961), 2431

11 Balz, G.,R. Birkner:
Die Bestimmung des Aluminiumschwächungsgleichwertes von Knochengewebe beim Lebenden
Strahlentherapie 99 (1956), 221

12 Bartelheimer, H., P. Freyschmidt:
Über Möglichkeiten der Objektivierung von diagnostischen Verfahren durch akustische Analysen
Klin. Wschr. 39 (1961), 985

13 Bürger, M.:
Die Transmineralisation der menschlichen Gewebe als Ausdruck ihrer Biomorphose
Dtsch. med. Wschr. 85 (1960), 1493

14 Dulce, H. J.:
Der Stoffwechsel des Knochens im Licht neuer physiologisch - chemischer Erkenntnisse
48. Kongress Orthopäd. Gesellschaft, Berlin 1960

15 Dulce, H. J.:
Chemische Analyse des Knochens
Kolloquium 1963, Berlin Medicus - Verlag

16 Engström, A.:
Acta radiol. 31 (1949), 483
zitiert aus: Balz,G. Strahlentherapie 99 (1956)221

17 Frommhold, G., L. Schoknecht:
Untersuchung über die Absorption und Feinstruktur von Knochen mittels monochromatischer Rö.Strahlen
Fortschr. Röntgenstr. 93(1960),358

18 Glocker:
Leitfaden der Med. Röntgentechnik

Lebenslauf

Am 26. 4. 1939 wurde ich, Herbert Imig, als Sohn des Dr. Walter Imig und seiner Ehefrau Liselotte Imig, geb. Seidel in Bonn geboren. Von Ostern 1946 ab besuchte ich die Volksschule Remlingrade und trat 1950 in das Neusprachliche Gymnasium Aue in Wuppertal ein. Wegen eines Wohnwechsels ging ich ab Ostern 1955 in das Ernst Kalkuhl Gymnasium in Oberkassel, wo ich 1959 das Abitur bestand. Ich immatrikulierte mich an der Fried. Wilh. Universität Bonn für die Fächer Philosophie und Germanistik und wechselte im Herbst 1959 auf das Fach Medizin um. Im Frühjahr 1962 bestand ich das Physikum und nach einem klinischen Semester in Bonn ging ich an die Freie Universität Berlin, wo ich im Oktober 1965 das Medizinische Staatsexamen bestand.

Berlin, Juli 66